

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIANA WILSE LANDOLFI TEIXEIRA DE CARVALHO

CONFIGURAÇÃO URBANA E BALANÇO HÍDRICO COM APLICAÇÃO DO
MODELO AQUACYCLE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BELÉM –
CURITIBA/PR

CURITIBA

2016

JULIANA WILSE LANDOLFI TEIXEIRA DE CARVALHO

CONFIGURAÇÃO URBANA E BALANÇO HÍDRICO COM APLICAÇÃO DO
MODELO *AQUACYCLE* NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BELÉM –
CURITIBA/PR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, curso de Mestrado, Setor Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Antônio de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Irani dos Santos

CURITIBA

2016

-
- C331c Carvalho, Juliana Wilse Landolfi Teixeira de
 Configuração urbana e balanço hídrico com aplicação do modelo
 aquacycle na bacia hidrográfica do Rio Belém – Curitiba/PR / Juliana Wilse
 Landolfi Teixeira de Carvalho. – Curitiba, 2016..
 136f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
 Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geografia, 2016.
- Orientador: Fabiano Antônio de Oliveira -- Coorientador: Irani dos
 Santos.
1. Urbanização. 2. Belém, Rio (PR). 3. Bacias hidrográficas – PR. I.
 Universidade Federal do Paraná. II. Oliveira, Fabiano Antônio de. III. Irani
 dos Santos. IV. Título.

CDD: 910.1711



MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO


Aos vinte e sete dias do mês de abril do ano de dois mil e dezesseis, na sala CT16, foi avaliada pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo relacionados, a Dissertação de Mestrado da aluna **JULIANA WILSE LANDOLFI TEIXEIRA DE CARVALHO** intitulada “**CONFIGURAÇÃO URBANA E BALANÇO HÍDRICO COM APLICAÇÃO DO MODELO AQUACYCLE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BELÉM - CURITIBA/PR**” que obteve como resultado final: aprovada.

(RES. 65/09 CEPE Art. 69. Os examinadores avaliarão a dissertação ou a tese considerando o conteúdo, a forma, a redação, a apresentação e a defesa do trabalho, decidindo pela aprovação, ou reprovação do trabalho de conclusão do aluno.

Parágrafo único. A ata da sessão pública da defesa de dissertação ou tese indicará apenas a condição de aprovado ou reprovado.

OBS: este documento tem a validade de 60 dias a contar desta data.

Nome e assinatura da Banca Examinadora:



Prof. Dr. Fabiano Antonio de Oliveira - orientador



Prof. Dr. Irani dos Santos - coorientador



Prof. Dr. Cristovão Vicente S. Fernandes - DHS/UFPR



Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos - DHS/UFPR

*À minha mãe Wilse,
Ao meu pai Jeferson,
Ao meu noivo Luciano
E à toda a população que de alguma forma sofre as consequências da má
gestão dos recursos hídricos*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Apreendi que nada se constrói sozinho, pois muitos caminham ao nosso lado, contribuindo para nosso crescimento e formação humana.

À estes agradeço imensamente:

À Deus, por sempre se fazer presença, inspirando meus sonhos e me fazendo sempre mais forte e serena do que acredito que posso ser.

À minha família, Wilse, Jeferson, Jefinho e Claudio, por serem meu alicerce, por ter me ensinado a ser quem sou e ter me dado incondicional apoio durante o processo do mestrado, especialmente aos meus pais. Ao meu pai, por me ensinar a enxergar a alegria da construção do caminho. À minha mãe, por ser sempre tão amiga, pelo amor, carinho e preocupação à mim despendidos. Ao meu noivo Luciano, pelo imenso amor, por estar ao meu lado sempre, nos momentos alegres e tristes, nos desafios e nas conquistas, por compartilhar comigo do amor pela Geografia, por compreender o cansaço, pelas indispensáveis contribuições na construção desta pesquisa.

Ao Professor Irani dos Santos, que me “apresentou aos rios” ainda durante a graduação, agradeço pela atenciosa orientação, por toda a ajuda, pelos incentivos, por confiar no meu trabalho e aprender junto comigo os desafios da modelagem no Aquacycle.

Ao Professor Fabiano de Oliveira, pelo acolhimento, orientação e contribuições.

Aos Professores Daniel Costa dos Santos e Eduardo Vedor de Paula pelas contribuições na banca de qualificação.

Ao Rodrigo M. de Souza pelo ajuste das curvas-chave e cálculos do índice escoamento de base e constante de recessão quase na véspera de Natal e logo após ter defendido seu doutorado.

À Bianca Canestraro, pela solicitude na ajuda com a tradução do resumo.

“Aqueles que passam por nós não vão sós, não nos deixam sós, deixam um pouco de si e levam um pouco de nós.” *Antoine de Saint-Exupéry*

“Os rios que eu encontro vão seguindo comigo.”

João Cabral M. Neto

RESUMO

A inserção de elementos antrópicos nas bacias de drenagem faz crescer a complexidade dos sistemas hidrográficos, alterando profundamente a dinâmica natural do ciclo hidrológico. Inserido no contexto da Hidrologia Urbana, o presente trabalho discute e investiga, sob a luz da abordagem sistêmica, os efeitos da configuração urbana no balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Belém, com área de drenagem de 42,6 km², localizada no município de Curitiba/PR. Foi utilizado o modelo *Aquacycle* para simulação do balanço hídrico urbano diário, o qual foi desenvolvido na Universidade de Melbourne para simular o ciclo urbano da água como um todo integrado (sistema de águas pluviais, residuais e abastecimento público de água potável). Trata-se de um modelo pouco utilizado pela comunidade científica internacional e com aplicação ainda inédita no Brasil. Além da simulação do balanço hídrico para a bacia hidrográfica, foram gerados resultados para 14 unidades de resposta hidrológica delimitadas na área de estudo. Dentre os dados necessários para modelagem estão uso da terra, uso da água, dados climáticos e dados para calibração. O mapeamento do uso da terra mostrou que 72% da superfície da bacia encontra-se impermeabilizada, sendo que a proximidade da unidade de resposta hidrológica com a área central da cidade aumenta o grau de impermeabilização. De maneira geral, a área de estudo apresenta predominância de ocupação de telhados (33%), seguido de áreas pavimentadas (26%), jardins (18%), ruas (13%) e espaços públicos abertos (10%). *Aquacycle* apresentou desempenho satisfatório na simulação do balanço hídrico urbano. A calibração do modelo mostrou resultados afetos ao controle e gestão de recursos hídricos na região como 40% de perda da água tratada no sistema de abastecimento público, afluência de 46% do esgoto gerado na área de estudo diretamente no rio Belém e ligação direta à rede de esgoto de 15% do escoamento superficial gerado em áreas impermeáveis da bacia. A avaliação dos componentes do ciclo hidrológico frente à configuração urbana nas unidades de resposta hidrológica evidenciou relação do incremento de áreas impermeáveis com o aumento do escoamento superficial, com a diminuição na recarga do aquífero freático via infiltração natural da água pluvial e com a diminuição da evapotranspiração. Por outro lado, o escoamento de base é bastante afetado pela contribuição das perdas na rede de distribuição de água tratada e pelo lançamento de esgoto na rede de drenagem. Nota-se que apesar do Belém ser um importante rio curitibano, apresenta ainda sérios problemas de gestão dos principais componentes do balanço hídrico urbano.

Palavras-chave: Urbanização; Aquacycle; Balanço Hídrico; Rio Belém.

ABSTRACT

The insertion of anthropic elements in catchment drainage increases the complexity of hydrologic systems, changing strongly natural dynamics in hydrological cycle. Inserted in context of Urban Hydrology, this study discusses and investigates, in systemic approach, the effects of the urban configuration in water balance in Belém river drainage basin, with 42.6 km² drainage area, located in Curitiba / PR. We used the Aquacycle model for simulating daily urban water balance, which was developed at Melbourne University to simulate the urban water cycle as an integrated whole (rain water, wastewater and public drinking water system). This model is not commonly used by the international scientific community and its application is a novelty in Brazil. In addition to the simulation of water balance for the river basin, were generated results for 14 hydrologic unit response defined in the study area. Among the needed data for modeling are: land use, water use, climate and calibration data. Mapping of land use shows that 72% of the drainage basin surface is waterproofed, and that the proximity of the hydrologic unit response to the central area in the city increases the degree of waterproofing. In general, the study area has predominantly occupying roofs (33%), followed by paved areas (26%), gardens (18%), streets (13%) and public open spaces (10%). Aquacycle showed satisfactory performance in the simulation of urban water balance. Calibration of model presented results assigned to the water resources control and management in the region, as 40% loss of treated water in the public water system, inflow of 46% of the sewage generated in study area directly to Belém river and 15% of surface runoff generated from waterproofed areas connected to the sewage system. Evaluation of the components in hydrological cycle considering urban configuration in hydrologic unit response showed a relation between the increase in waterproofed areas, the increase of surface runoff, the decrease of groundwater recharge via natural rainwater infiltration into the soil and the decrease of evapotranspiration. On the other hand, the base flow is greatly affected by the contribution of leakages in treated water distribution system and by the sewage discharge in drainage network. We note that despite Belém to be an important river in Curitiba, still presents serious management problems of the main components in urban water balance.

Keyword: Urbanization; Aquacycle; Water Balance; Belém River.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 CICLO URBANO DA ÁGUA.....	24
FIGURA 2 VARIABILIDADE ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS DAS BACIAS URBANAS.....	25
FIGURA 3 LEITOS DO RIO	32
FIGURA 4 ÁREA DE INUNDAÇÃO EM AMBIENTE URBANIZADO E NÃO URBANIZADO	34
FIGURA 5 IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO HIDROGRAMA	35
FIGURA 6 ESCALAS ESPACIAIS UTILIZADAS NO <i>AQUACYCLE</i>	47
FIGURA 7 ORGANOGRAMA METODOLÓGICO	55
FIGURA 8 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	57
FIGURA 9 PRINCIPAIS PONTOS DE REFERÊNCIA DA ÁREA DE ESTUDO.....	59
FIGURA 10 HIPSOMETRIA	61
FIGURA 11 ÁREAS INUNDAVEIS E RENDA NOMINAL PER CAPITA	64
FIGURA 12 SELEÇÃO DE SETORES CENSITÁRIOS PARA A ÁREA DE ESTUDO (1,2 E 3) E MAPA TEMÁTICO DE DENSIDADE DEMOGRÁFICA POR SETOR CENSITÁRIO (4).....	66
FIGURA 13 REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO PARA DELIMITAÇÃO DE <i>CLUSTERS</i> NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BELÉM.....	69
FIGURA 14 ESCALA DE DETALHE PARA MAPEAMENTO DE USO DA TERRA.....	73
FIGURA 15 CRITÉRIOS PARA VETORIZAÇÃO DE POLÍGONOS PARA MAPEAMENTO DE USO DA TERRA (1).....	74
FIGURA 16 CRITÉRIOS PARA VETORIZAÇÃO DE POLÍGONOS PARA MAPEAMENTO DE USO DA TERRA (2).....	75
FIGURA 17 CRITÉRIOS PARA VETORIZAÇÃO DE POLÍGONOS PARA MAPEAMENTO DE USO DA TERRA (3).....	76
FIGURA 18 REPRESENTAÇÃO CONCEITUAL DO CICLO URBANO DA ÁGUA.....	78
FIGURA 19 REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM TANQUE DE ÁGUAS PLUVIAIS	88
FIGURA 20 REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM TANQUE DE ÁGUAS RESIDUAIS	89
FIGURA 21 REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA DO AQUIFERO	91
FIGURA 22 CONSUMO DE ÁGUA PER CAPITA POR BAIRRO DE CURITIBA	95
FIGURA 23 CURVA DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS	107
FIGURA 24 FLUVIOGRAMA DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS	109
FIGURA 25 <i>CLUSTERS</i> DA BACIA DO RIO BELÉM.....	111

FIGURA 26 DISTRIBUIÇÃO DE CATEGORIAS DE USO DA TERRA POR <i>CLUSTER</i>	113
FIGURA 27 DISTRIBUIÇÃO DE CATEGORIAS DE USO DA TERRA POR <i>CLUSTER</i>	114
FIGURA 28 DISTRUBUIÇÃO DE ÁREAS PERMEÁVEIS E IMPERMEÁVEIS POR <i>CLUSTER</i>	116
FIGURA 29 DISTRIBUIÇÃO DE CATEGORIAS DE USO DA TERRA, ÁREAS PERMEÁVEIS E IMPERMEÁVEIS NA BACIA DO RIO BELÉM	117
FIGURA 30 BALANÇO HÍDRICO ANUAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BELÉM.....	118
FIGURA 31 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NA ESCALA <i>CLUSTER</i>	121
FIGURA 32 RELAÇÃO ENTRE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM	122
FIGURA 33 RELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM	123
FIGURA 34 RELAÇÃO ENTRE REABASTECIMENTO DO NÍVEL FREÁTICO E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM.....	123
FIGURA 35 RELAÇÃO ENTRE ESCOAMENTO DE BASE E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM	123
FIGURA 36 RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM	124

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 RESUMO DE TRABALHOS QUE UTILIZARAM O MODELO <i>AQUACYCLE</i> – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE DADOS	52
TABELA 2 RESUMO DE TRABALHOS QUE UTILIZARAM O MODELO <i>AQUACYCLE</i> – OBJETIVOS E PRINCIPAIS RESULTADOS.....	53
TABELA 3 PRINCIPAIS CRITÉRIOS PARA CONSTRUÇÃO NAS ZONAS IDENTIFICADAS NA ÁREA DE ESTUDO.....	67
TABELA 4 DENOMINAÇÃO DOS <i>CLUSTERS</i> DA ÁREA DE ESTUDO	70
TABELA 5 VETORIZAÇÃO DE "QUADRAS BASE" NOS CLUETERS	72
TABELA 6 DESVIO PADRÃO DAS "QUADRAS BASE"	77
TABELA 7 PERFIL DE USO DE ÁGUA PARA A CIDADE DE CAMBERRA (AUSTRÁLIA) 2003.....	84
TABELA 8 PERFIL RESIDENCIAL DE USO DE ÁGUA PARA A BACIA DO RIO BELÉM.....	96
TABELA 9 BLOCOS: SEQUENCIA DE DADOS DE ENTRADA	97
TABELA 10 <i>CLUSTERS</i> : SEQUENCIA DE DADOS DE ENTRADA	98
TABELA 11 BACIA DE DRENAGEM: SEQUENCIA DE DADOS DE ENTRADA	99
TABELA 12 PARÂMETROS MEDIDOS: SEQUÊNCIA DE DADOS DE ENTRADA.....	100
TABELA 13 NÍVEIS INICIAIS DE ARMAZENAMENTO: SEQUÊNCIA DE DADOS DE ENTRADA	102
TABELA 14 DADOS DE ENTRADA PARA CALIBRAÇÃO	104

LISTA DE SIGLAS

DNOS	-	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
FIEP	-	Federação das Indústrias do Estado do Paraná
INMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
JB	-	Jardim Botânico
OD	-	Oxigênio Dissolvido
pH	-	Potencial Hidrodinâmico
PUC PR	-	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
SANEPAR	-	Companhia de Saneamento do Paraná
SE	-	Setor Especial
SECC	-	Setor Especial Centro Cívico
SIG	-	Sistema de Informações Geográficas
SNIS	-	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UVQ	-	Urban Volume and Quality
ZC	-	Zona Central
ZEE	-	Zona Especial Educacional
ZRV 1	-	Zona Residencial (vários) 1
ZRV 2	-	Zona Residencial (vários) 2
ZRV 3	-	Zona Residencial (vários) 3
ZR3 1	-	Zona Residencial 3-1
ZR3 2	-	Zona Residencial 3-2
ZR3 3	-	Zona Residencial 3-3
ZR4 1	-	Zona Residencial 4-1
ZR4 2	-	Zona Residencial 4-2
ZR4 3	-	Zona Residencial 4-3
VTA's	-	Visitas Técnicas Autorizadas

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$%I$	Água importada	%
$A1$	Área de armazenamento permeável 1	%
ASt	Volume armazenado no tanque de superfície do sistema de abastecimento do aquífero	mm
$ASt-1$	Volume armazenado no tanque de superfície do sistema de abastecimento do aquífero no dia anterior	mm
At	Volume armazenado no aquífero	mm
$At-1$	Volume armazenado no aquífero no dia anterior	mm
BF	Escoamento de base	mm
BI	Índice de escoamento de base	adimensional
BRC	Constante de recessão do escoamento de base	adimensional
Ca	Consumo de água proveniente do armazenamento no aquífero	mm
Csw	Consumo de água proveniente do tanque de águas pluviais	mm
Cww	Consumo de água proveniente do tanque de águas residuais	mm
Dv	Volume de demanda	mm
E	Coeficiente de eficiência	adimensional
Ea	Evapotranspiração atual	mm
EIA	Área impermeável eficaz	m ²
$Eimp$	Evaporação das superfícies impermeáveis	mm
EPA	Área pavimentada eficaz	%
Ep	Evapotranspiração potencial	mm
Epc	Capacidade da cobertura vegetal a transpirar	mm
ERA	Área de telhado eficaz	%
$ERDA$	Área de rua eficaz	%
EXC	Excesso de umidade no solo	mm
ff	Primeira descarga	mm
GWR	Recarga de águas subterrâneas	mm

<i>GWS</i>	Nível de armazenamento de águas subterrâneas	
<i>i</i>	Período calibrado	mm
<i>I</i>	Água Importada	dias
<i>II</i>	Índice de infiltração de águas pluviais no sistema de águas residuais	mm adimensional
<i>Ij</i>	Volume de água injetada no aquífero	
<i>Ina</i>	Entrada de água para recarga do aquífero	mm
<i>INF</i>	Infiltração de águas pluviais no sistema de águas residuais	mm mm
<i>INFS</i>	Nível de armazenagem de infiltração	
<i>Insw</i>	Entrada de águas pluviais no tanque de armazenamento de águas pluviais	mm mm
<i>Inww</i>	Entrada de águas residuais no tanque de armazenamento de águas residuais	mm
<i>IR</i>	Necessidade de irrigação do jardim	
<i>IRC</i>	Constante de recessão da infiltração	mm
<i>IRUN</i>	Escoamento superficial de áreas impermeáveis	adimensional
<i>ISI</i>	Entrada de águas pluviais no sistema de águas residuais	mm mm
<i>IWU</i>	Uso de água no interior das residências	
<i>LD</i>	Vazamentos no sistema de abastecimento de água	mm
<i>n</i>	Número de vezes em que há escoamento medido e simulado simultaneamente no período calibrado	mm adimensional
<i>N</i>	Período simulado	
<i>NEAR</i>	Esc. superficial da área impermeável não eficaz	dias
<i>Oa</i>	Excesso de água do tanque de superfície do sistema de utilização de água do aquífero	mm mm
<i>Oww</i>	Excesso de água no tanque de armazenamento de águas residuais	mm
<i>p</i>	Número total de falhas de eventos no período total de simulação	adimensional
<i>P</i>	Precipitação	mm
<i>PIL</i>	Perda inicial máxima de água nas áreas pavimentadas	mm

<i>PS1</i>	Nível do armazenamento permeável 1	mm
<i>PS1c</i>	Capacidade de armazenamento permeável 1	mm
<i>PS2</i>	Nível do armazenamento permeável 2	mm
<i>PS2c</i>	Capacidade de armazenamento permeável 2	mm
<i>PST</i>	Nível de armazenamento de superfície das áreas pavimentadas	mm
<i>Q</i>	Vazão de saída	mm
<i>RDIL</i>	Perda inicial máxima de água na área das ruas	mm
<i>RDST</i>	Nível de armazenamento de superfície das ruas	mm
<i>Re</i>	Confiabilidade do evento	adimensional
<i>REC</i>	Soma do escoamento medido	mm
\overline{REC}	Valor médio registrado no período de tempo selecionado	mm
<i>RIL</i>	Perda inicial máxima de água no telhado	mm
<i>RIS</i>	Infiltração de água no solo	mm
<i>Rs</i>	Escoamento fluvial	mm
<i>RST</i>	Armazenamento de água na superfície dos telhados	mm
<i>Rv</i>	Confiabilidade volumétrica	adimensional
<i>Rw</i>	Águas residuais	mm
<i>S</i>	Balanço hídrico	adimensional
<i>SDOF</i>	Padrão temporal de escoamento ou consumo	adimensional
<i>SIM</i>	Soma do escoamento simulado	mm
<i>SIM/REC</i>	Boa replicação de quantidade	adimensional
<i>SRUN</i>	Escoamento superficial de áreas permeáveis	mm
<i>Sv</i>	Volume total fornecido durante o período de tempo <i>N</i>	mm
<i>t</i>	Escala de tempo	dia
<i>TIA</i>	Área total impermeável	m ²
<i>TG</i>	Gatilho de irrigação do jardim	mm
<i>u</i>	Montante de água utilizado em um período	mm
<i>UR</i>	Taxa de utilização	%
<i>Wt</i>	Volume de armazenamento no tanque de águas residuais	mm
<i>Wt-1</i>	Volume de armazenamento no tanque de águas residuais no dia anterior	mm

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVOS.....	21
2 ABORDAGENS TEÓRICAS.....	22
2.1 HIDROLOGIA URBANA.....	22
2.1.1 Impactos da urbanização no ciclo hidrológico e no balanço hídrico	26
2.1.2 Drenagem Urbana	29
2.1.2.1 Inundações	32
2.1.2.2 Crise hídrica	35
2.1.3 Controle de impactos e desenvolvimento sustentável.....	36
2.1.3.1 Aumento e manutenção de áreas permeáveis.....	37
2.1.3.2 Uso de águas pluviais e reuso de águas residuais	38
2.1.3.3 Revitalização e renaturalização de rios e bacias hidrográficas	38
2.1.4 Cenário brasileiro de águas urbanas.....	40
2.2 MODELAGEM DO BALANÇO HÍDRICO URBANO.....	43
2.3 <i>AQUACYCLE</i>	46
2.4 APLICAÇÕES DO MODELO <i>AQUACYCLE</i>	49
3 PERCURSO METODOLÓGICO	54
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	56
3.2 CRITÉRIOS PARA DELIMITAÇÃO DE UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA.....	65
3.3 CRITÉRIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA DINÂMICA HÍDRICA DAS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA DELIMITADAS.....	70
3.4 DESCRIÇÃO DO MODELO	77
3.4.1 Escoamento fluvial	79
3.4.1.1 Escoamento superficial de áreas impermeáveis	79
3.4.1.2 Escoamento superficial de áreas permeáveis	80
3.4.1.3 Entrada de águas pluviais no sistema de águas residuais	81
3.4.1.4 Irrigação.....	82
3.4.2 Evapotranspiração	83

3.4.3 Uso da água	84
3.4.4 Vazamentos no sistema de abastecimento de água	84
3.4.5 Água importada.....	85
3.4.6 Águas residuais	85
3.4.7 Armazenamento de água nas superfícies impermeáveis	86
3.4.8 Armazenamento de água nas superfícies permeáveis	86
3.4.9 Recarga do aquífero freático.....	86
3.4.10 Sistemas alternativos para uso e reaproveitamento de água disponíveis no <i>Aquacycle</i>	87
3.4.10.1 Armazenamento e utilização de águas pluviais.....	87
3.4.10.2 Tratamento e armazenamento de águas residuais	88
3.4.10.3 Armazenamento e utilização de água do aquífero de modo artificial	89
3.4.10.4 Avaliação do desempenho de um sistema de reutilização	91
3.4.10.5 Otimização do tamanho de um tanque	92
3.4.10.6 Transferência de água entre clusters	92
3.4.11 Principais premissas e limitações do modelo	92
3.5 DADOS DE ENTRADA PARA MODELAGEM	93
3.5.1 Dados climáticos.....	94
3.5.2 Perfil de uso da água	94
3.5.3 Bloco, <i>cluster</i> e bacia de drenagem	96
3.5.4 Parâmetros espaciais.....	99
3.5.5 Níveis iniciais de armazenamento.....	102
3.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	102
3.6.1 Desempenho da simulação.....	106
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	110
4.1 UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA.....	110
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA DINÂMICA HÍDRICA DAS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA.....	113
4.3 SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BELÉM	117
4.4 AVALIAÇÃO DOS COMPONENTES DO CICLO HIDROLÓGICO FRENTE À CONFIGURAÇÃO URBANA NAS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA	120
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
REFERÊNCIAS	130

1 INTRODUÇÃO

Ambientes urbanos concentram cada vez mais população (GUERRA e CUNHA, 2010). Autores como Tucci (2001; 2008), Porto *et al.* (2014) e Jacobi (2004) sinalizam que no Brasil, em especial, essa concentração é fortemente ligada a um crescimento desordenado e acelerado, provocando uma série de mudanças no ambiente. Neste sentido, a intensificação do processo de urbanização abre espaço às discussões sobre seus desdobramentos relacionados à geração de impactos, tanto no âmbito social quanto ambiental.

Estudos apontam à diversidade de impactos gerados pela urbanização sobre os diferentes elementos naturais - solo, água, clima, relevo, vegetação e fauna - e como tais interferências afetam o meio e a qualidade de vida humana. Mudanças nos padrões de dinâmica hídrica das bacias de drenagem urbanas possuem importante representatividade no estudo de impactos, em decorrência do aumento de episódios de escassez de água (resultantes da impermeabilização do solo, diminuição da recarga do nível freático e aumento por demanda) e de enchentes (resultantes da ineficiência dos sistemas de drenagem, impermeabilização do solo, retificação e canalização de canais, assoreamento de rios e ocupações irregulares).

Estudos como de Mitchell, Main e McMahon (2001), Lekkas *et al.* (2008), Karka *et al.* (2007), Chenevey e Buchberger (2013), Lee, *et al.* (2010), Cleugh *et al.* (2005), Brinquis (2007), Situmorang (2008), indicam que as principais alterações observadas no balanço hídrico em função da urbanização são: aumento no escoamento superficial, dos picos de vazão máxima e risco de enchentes, aumento do volume de entrada e saída de água do sistema urbano, diminuição dos índices de evapotranspiração, com consequente alteração no microclima urbano, diminuição dos níveis de infiltração da água no solo, de recarga do nível freático, do escoamento de base dos rios em período de estiagem e do nível de água dos reservatórios destinados ao abastecimento público. Tucci (2014b) sinaliza que a inserção de elementos antrópicos nas bacias de drenagem faz crescer a complexidade dos sistemas hidrográficos, alterando profundamente a dinâmica natural do ciclo hidrológico.

Frente às alterações no ciclo hidrológico em ambientes urbanos, a presente pesquisa delinea-se no contexto da Hidrologia Urbana, a qual estuda os impactos do desenvolvimento das cidades no ciclo urbano da água e no balanço hídrico, bem como de alternativas para minimização de seus efeitos negativos (LIMA, 2010). Discutem-se, portanto, questões ligadas aos impactos do desenvolvimento das cidades gerados sobre balanço hídrico, via estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Belém (42,6 km²), localizada em área densamente urbanizada da cidade de Curitiba/PR. Busca-se compreender os efeitos da configuração urbana no balanço hídrico, com utilização do modelo hidrológico distribuído *Aquacycle*.

A principal contribuição deste trabalho é o olhar sistêmico que imprime ao balanço hídrico urbano no contexto de uma cidade brasileira. Isto ocorre a partir da identificação das dinâmicas de funcionamento do sistema de abastecimento público, coleta e tratamento de efluentes, drenagem pluvial e configuração urbana, bem como na identificação das interações existentes entre os sistemas.

Sua relevância em relação à área de estudo selecionada, por sua vez, deve-se inicialmente à importância da bacia hidrográfica para Curitiba, a qual drena cerca de 20% da área do município, abrigando toda a área central da cidade, centro histórico, instituições como as sedes do governo municipal e estadual, diversos campi da UFPR e um campi da PUC-PR, além de diversos parques e bosques. Outro aspecto importante refere-se ao histórico de enchentes na região, que datam desde o final do século XIX. Atualmente, as enchentes são ainda recorrentes nos fundos de vale do médio e baixo curso do rio Belém e nas áreas próximas às suas nascentes, entre os bairros Abranches, Cachoeira e Barreirinha. Em ocasiões de eventos pluviométricos intensos e temporalmente concentrados, há ocorrência de enchentes também no centro da cidade.

Em relação ao *Aquacycle*, ressalta-se que se trata de um modelo de balanço hídrico urbano diário desenvolvido na Universidade de Melbourne (Austrália) para simular o ciclo urbano da água como um todo integrado, incluindo sistema de águas pluviais, rede de abastecimento público e águas residuais (MITCHELL, 2005). Além de caracterizar o fornecimento e a demanda de águas pluviais e residuais urbanas em termos de quantidade e distribuição

temporal, o modelo possui uma ferramenta para avaliar o desempenho de esquemas alternativos para uso de águas pluviais e tratamento e reúso de águas residuais. Trata-se de um modelo ainda pouco utilizado pela comunidade científica internacional e com aplicação ainda inédita no Brasil.

Ressalta-se que este trabalho segue abordagem sistêmica, pois parte da premissa de Coelho (2010) e Lima (2010), de que a cidade é um ambiente complexo, dinâmico, multifacetado e de um todo de processos interligados. A sistemicidade se encontra também no fato de se apropriar da bacia hidrográfica como unidade de análise.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar os efeitos da configuração urbana no balanço hídrico, com aplicação do modelo *Aquacycle* na bacia hidrográfica do rio Belém – Curitiba/PR.

De maneira específica objetiva-se:

- Definir unidades de resposta hidrológica no contexto de hidrologia urbana, por meio da análise integrada de dados demográficos e de uso e ocupação do espaço urbano da área de estudo.
- Caracterizar os componentes da dinâmica hídrica das unidades de resposta hidrológica delimitadas.
- Simular o balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Belém com o modelo distribuído *Aquacycle*.
- Avaliar os componentes do ciclo hidrológico frente à configuração urbana em cada unidade de resposta hidrológica.

2 ABORDAGENS TEÓRICAS

Esta seção do trabalho se refere à revisão de literatura necessária ao embasamento e desenvolvimento da presente pesquisa. Inicialmente é feita uma explanação sobre Hidrologia Urbana (vertente da Hidrologia na qual esta pesquisa se insere), com discussões específicas sobre drenagem urbana, impactos da urbanização no balanço hídrico e alternativas para minimização de seus efeitos negativos. Realiza-se também uma breve discussão sobre o atual cenário brasileiro de gestão de águas urbanas.

Em seguida, discute-se o papel da modelagem na gestão de sistemas ambientais e da água em meio urbano, elencando as principais características dos modelos hidrológicos, sua chave classificatória, vantagens e limitações existentes em sua utilização. São discutidos então alguns dos modelos utilizados para geração de balanço hídrico urbano, com maior enfoque no modelo utilizado nesta pesquisa.

Por fim, elencam-se alguns dos trabalhos que já se utilizaram do *Aquacycle*, buscando-se compreender de que maneiras o modelo tem sido utilizado em trabalhos científicos. A revisão de literatura deste capítulo alicerça a definição da área de estudo, bem como dos parâmetros e critérios metodológicos adotados.

2.1 HIDROLOGIA URBANA

De acordo com Tucci (2014a), a Hidrologia Urbana se desenvolveu como vertente da Hidrologia Aplicada ¹face à intensificação do processo de urbanização e à crescente preocupação com a gestão dos recursos hídricos em ambiente urbano. Definida como estudo dos processos hidrológicos em

¹ A Hidrologia, grosso modo, divide-se em Hidrologia Científica e Aplicada. A primeira delas (Científica) dedica-se à descrição e quantificação dos processos físicos que ocorrem nas bacias de drenagem, através de estudos em bacias experimentais, enquanto que a segunda (Aplicada), volta-se aos diferentes problemas que envolvem a utilização de recursos hídricos, preservação do meio ambiente e ocupação de bacias hidrográficas (TUCCI, 2014a).

ambientes afetados por urbanização, a Hidrologia Urbana estuda os impactos do desenvolvimento das cidades no ciclo urbano da água e no balanço hídrico, bem como alternativas para minimização de seus efeitos negativos (LIMA, 2010).

A inserção de elementos antrópicos nas bacias de drenagem faz crescer a complexidade dos sistemas hidrográficos, alterando a dinâmica natural do ciclo hidrológico (TUCCI, 2014b), conceito este definido por Silveira (2014, p.35) como:

(...) fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. A superfície terrestre abrange os continentes e os oceanos, participando do ciclo hidrológico a camada porosa que recobre os continentes (solos e rochas) e o reservatório formado pelos oceanos. Parte do ciclo hidrológico é constituída pela circulação da água na própria superfície terrestre, isto é: a circulação da água no interior e na superfície dos solos e rochas, nos oceanos e nos seres vivos. (...) O intercâmbio entre as circulações da superfície terrestre e da atmosfera, fechando o ciclo hidrológico, ocorre nos dois sentidos: a) no sentido superfície-atmosfera (...) b) no sentido atmosfera-superfície (...)

O ciclo hidrológico, em ambiente natural, compõe-se inicialmente de precipitação da água acumulada na atmosfera, podendo ela ocorrer em forma de chuva, neve, granizo ou orvalho. No trajeto em direção à superfície, parte da água precipitada sofre evaporação. No continente, a água precipitada pode percorrer diversos caminhos: infiltração no solo e posterior percolação, podendo formar aquíferos, abastecer lençóis freáticos ou corpos d'água; escoamento superficial em casos de saturação do solo; interceptação da água pela vegetação ou outros elementos; congelamento; evaporação ou evapotranspiração, fazendo-a retornar à atmosfera (LEOPOLD, 1996). Voltando a condensação, o ciclo recomeça.

A inserção de elementos antrópicos no meio natural – tais como edificações, pavimentações, alterações no relevo, retificações e canalizações de rios – dá nova configuração ao ciclo hidrológico. O ciclo urbano da água é, portanto, complexo e apresenta diferentes possibilidades de entrada,

permanência e saída de água do sistema, conforme fluxograma abaixo (FIGURA 1):

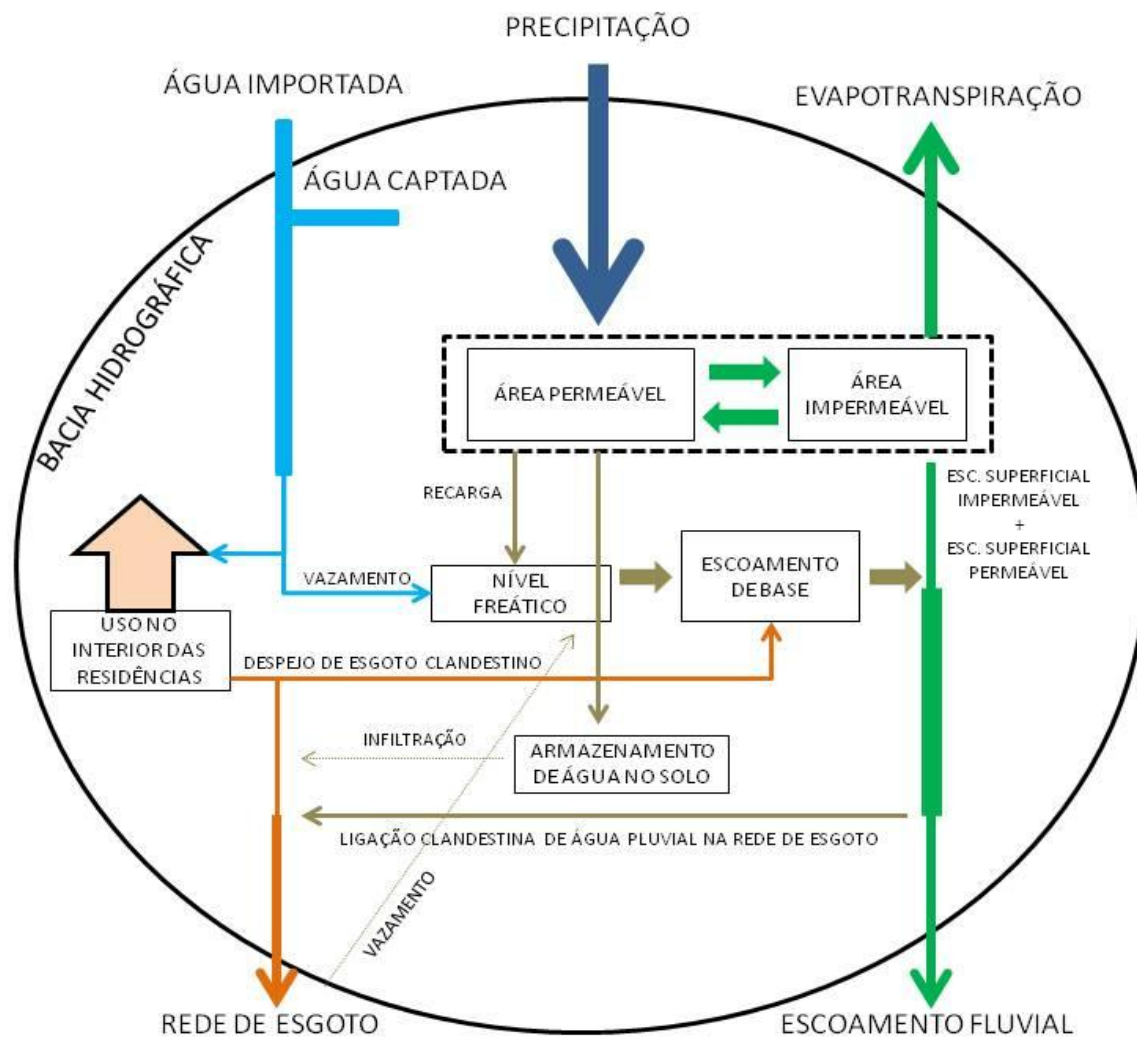


FIGURA 1 CICLO URBANO DA ÁGUA

Mitchell (2005) explica que dois sistemas operam em ambientes urbanizados: a rede de escoamento de águas pluviais e a rede de abastecimento de água potável, com posterior disposição de águas residuais. Os processos naturais ocorrem concomitantemente a estas duas redes inseridas pelo homem.

Em relação à entrada de água no sistema, antes proveniente apenas da precipitação, adiciona-se a entrada de água importada ou captada da própria bacia, destinada ao consumo ao ar livre ou no interior das residências, estabelecimentos comerciais e industriais. Na rede de abastecimento de água

potável ocorrem vazamentos, que contribuem para o aumento do volume de água no freático, somando-se ao escoamento de base. A água consumida pela população destina-se à rede de esgoto para posterior tratamento ou, como ocorre de maneira usual nos centros urbanos brasileiros, é parcialmente ligada clandestinamente à rede de águas pluviais, contribuindo para contaminação dos rios.

Quanto às novas trajetórias, destaca-se que a água precipitada, que outrora caía sobre superfície permeável ou sobre a vegetação, destina-se também, em ambiente urbano, à superfícies impermeáveis, gerando maior volume de escoamento superficial, que, por sua vez, direciona-se à rede de drenagem de águas pluviais ou clandestinamente à rede de esgoto. Além de interceptada pela vegetação, a água pode ficar retida nas diferentes superfícies impermeáveis (telhados, calçadas, ruas), de onde evapora.

A complexidade das bacias urbanas se deve a elevada variabilidade espacial de características fisiográficas e hidrológicas da paisagem, bem como da configuração do uso e ocupação da terra e características dos sistemas de abastecimento e drenagem, tornando-a um ambiente multifacetado. Lima (2010) ilustra tal complexidade na Figura 2, com a sobreposição e interação dos diferentes elementos que compõe a paisagem.

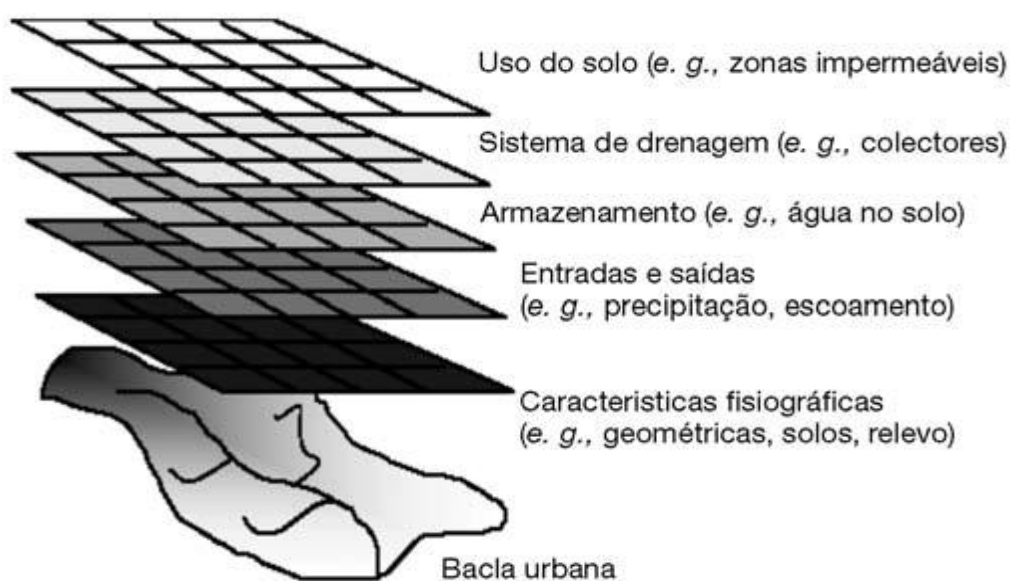


FIGURA 2 VARIABILIDADE ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS DAS BACIAS URBANAS.
FONTE: LIMA (2010, p.44)

A Hidrologia Urbana contempla estudos em drenagem urbana, controle de enchentes, produção e contenção de sedimentos, qualidade da água, manejo e conservação de mananciais, recarga do nível freático e alternativas sustentáveis de gestão de recursos hídricos (LAZARO, 1990). Nas linhas que se seguem, será apresentada discussão sobre os impactos da urbanização no ciclo hidrológico e no balanço hídrico.

2.1.1 Impactos da urbanização no ciclo hidrológico e no balanço hídrico

Estudos de Leopold (1968), Lazaro (1990), Porto *et al.* (2014), Lima (2010), Tucci (1997a, 2000, 2001, 2002, 2008), Botelho (2011) denotam o quão evidentes são as interferências da urbanização nos processos envolvidos no ciclo hidrológico e no balanço hídrico. Moretti (2004) destaca que os impactos se dão tanto em relação ao volume quanto à qualidade da água disponível no sistema.

Quanto ao volume, destacam-se as alterações no escoamento superficial direto em períodos de chuva, devido à impermeabilização do solo. “Áreas impermeáveis apresentam rugosidade hidráulica menor, aumentando a velocidade com que se processa o escoamento superficial e transportes associados” (LIMA, 2010 p.2). A água que deixa, portanto, de infiltrar no solo e passa a escoar superficialmente, diminui tempo de concentração na bacia e aumenta os picos de vazão máxima dos rios, acentuando a possibilidade de ocorrência de enchentes, especialmente em áreas periféricas e de ocupação ribeirinha irregular (TUCCI, 2001). Destaca-se ainda a redução da vazão nos cursos d’água em períodos de estiagem, ocasionada pela diminuição da infiltração da água no solo, do reabastecimento do nível freático e consequentemente, dos reservatórios destinados ao abastecimento público.

Os impactos referentes à alteração nas quantidades de água que circulam no sistema são claramente visíveis quando gerado o balanço hídrico. O balanço hídrico² é definido como relação entre aflúências e efluências

² Embora a bacia de drenagem seja o ambiente mais propício à geração do balanço hídrico, dada delimitação espacial bem definida para entrada e saída de água do sistema, ele pode ser

(entradas e saídas) de água ocorridas em determinado espaço e intervalo de tempo (LIMA, 2010), definido matematicamente, em uma bacia hidrográfica, como:

$$S(t+1) = S(t) + (P - E - Q) \cdot Dt \quad (1)$$

onde $S(t+1)$ e $S(t)$ é a quantidade de água na escala de tempo $t+1$ e t selecionadas, P é a precipitação na área da bacia no intervalo de tempo estabelecido, E é a evapotranspiração real no intervalo de tempo na bacia e Q é a vazão de saída no intervalo de tempo Dt . Quando o período de avaliação (Dt) é muito longo a diferença de armazenamento (S) pode ser considerada desprezível e

$$Q = P - E, \quad (2)$$

a vazão Q no tempo é o hidrograma de saída da bacia e representa o escoamento superficial (superfície das bacias) e subterrâneo (gerado pelos aquíferos) (TUCCI, 2009).

As principais alterações observadas no balanço hídrico em função da urbanização são: aumento no escoamento superficial, aumento dos picos de vazão máxima, aumento do volume de entrada e saída de água do sistema como um todo, diminuição dos índices de evapotranspiração, da infiltração de água no solo e da recarga do nível freático.

Em relação à qualidade da água, destaca-se a sua depreciação (tanto da água superficial quanto subterrânea) dada sua contaminação através de fontes pontuais e/ou difusas de poluição. As fontes pontuais de poluição provêm da destinação inadequada de efluentes domésticos, industriais e resíduos sólidos. As fontes difusas, por sua vez, resultam da própria rede de drenagem da bacia hidrográfica, afetando especialmente os canais fluviais, que

gerado também para uma camada de solo, trecho de rio, dentre outros ambientes (TUCCI, 2009).

são os receptores finais dos materiais que circulam no sistema (BOTELHO, 2011). De acordo com Schueller (1987) *apud* Tucci (2008), os primeiros 25 mm de escoamento superficial geralmente transportam grande parte da carga poluente proveniente do ambiente urbano. A qualidade da água da rede pluvial depende do tipo de uso da terra na bacia, da limpeza urbana, das ligações irregulares de esgoto, da intensidade da precipitação e de sua distribuição temporal e espacial (TUCCI, 2002).

Os principais efeitos da poluição hídrica são: aumento da concentração de coliformes termotolerantes, metais pesados e resíduos sólidos, alterações no *pH* e na temperatura da água, diminuição da concentração de *OD* e perda de biodiversidade. A contaminação dos corpos d'água, associada ao risco de inundações, especialmente em áreas ribeirinhas de ocupação irregular, faz crescer também o risco de propagação de doenças de veiculação hídrica.

A urbanização pode também intensificar o processo de erosão natural do solo³, instaurando erosão acelerada “em decorrência da quebra do equilíbrio do meio ambiente pelas atividades humanas, principalmente as advindas das alterações conduzidas na cobertura vegetal” (FENDRICH *et al.*, 1997 p. 21) e desproteção superficial do solo. O desmatamento e desenvolvimento urbano desordenado intensificam tal processo, culminando no assoreamento de canais fluviais e galerias.

Tucci (2008), ao discorrer sobre carga e produção de sedimentos e resíduos sólidos na rede de drenagem, aponta quatro diferentes estágios de desenvolvimento urbano, conforme abaixo:

- estágio de pré-desenvolvimento: caracterizado pela erosão natural;
- estágio inicial de desenvolvimento urbano: em função da retirada de cobertura vegetal e desproteção do solo para construção de estradas e edificações, caracteriza-se pelo aumento na produção de sedimentos e inserção de pequena produção de resíduos sólidos;
- estágio intermediário de desenvolvimento urbano: caracterizado pela fixação de parte da população, apresenta aumento na produção de resíduos sólidos e

³ “A erosão é um processo que se traduz na desagregação, transporte e deposição do solo, subsolo e rocha em decomposição, pelas águas ventos ou geleiras. (...) Erosão geológica ou normal é definida como a erosão que normalmente ocorre na superfície terrestre sob condições naturais ou não perturbadas” (FENDRICH *et al.*, 1997 p. 20-21).

importante movimentação de sedimentos naturais em decorrência das novas construções;

- estágio de área desenvolvida: estágio caracterizado pela consolidação da ocupação urbana. Nesta fase, a produção de sedimentos diminui em relação à fase anterior e a produção de resíduos sólidos chega ao ápice.

Nota-se, portanto, que em bacias urbanas completamente ocupadas e com solos praticamente impermeabilizados, a produção de sedimentos tende a decrescer e a produção de resíduos sólidos tende a aumentar.

O assoreamento de canais fluviais contribui também para o aumento do risco de inundações, em decorrência da diminuição do espaço disponível à passagem de água e redução da velocidade de escoamento. Uma prática comum aplicada a rios urbanos assoreados é a dragagem. Esta solução caracteriza-se, no entanto, como uma medida paliativa de curto prazo e de alto custo para as unidades gestoras. Outro problema que se apresenta, intrínseco ao processo de dragagem, é a destinação do material dragado, tendo em vista sua grande carga de poluentes agregados.

2.1.2 Drenagem Urbana

As pesquisas no âmbito da drenagem urbana possuem relevante representatividade no campo da Hidrologia Urbana, com expressivo arcabouço teórico, especialmente de natureza estrangeira, face às questões ligadas a inundações, crise hídrica e busca por medidas de drenagem sustentável (PORTO *et al.*, 2014).

Os autores Canholi (2014) e Porto *et al.* (2014) sinalizam que, por muitos anos, a drenagem urbana foi abordada de maneira adiáfora, tendo como principal objetivo remover de modo rápido e eficiente as águas pluviais em excesso, transferindo inundações e poluentes para jusante.

Tucci (2008) define quatro fases relativas à gestão da drenagem de águas urbanas, conforme abaixo – países em desenvolvimento, atualmente, ainda variam de estágio:

- fase pré-higienista: datada até o início do século XX, onde o esgoto era destinado a fossas ou à drenagem mais próxima, sem coleta ou tratamento de águas residuais e para consumo;
- fase higienista: do início do século XX até a década de 70, com objetivo de evitar a proliferação de doenças de veiculação hídrica, adotou-se a prática de captação de água para abastecimento público de fontes seguras à montante e despejo esgoto à jusante. É nesta fase que se busca escoar as águas pluviais de maneira rápida e eficiente, via canalização e retificação de rios, com transferência de inundações e poluentes para jusante;
- fase corretiva: a partir da década de 70 foram realizados investimentos maciços em coleta e tratamento de esgoto doméstico e industrial, com o objetivo de recuperar a qualidade da água nos rios urbanos. É também durante esta fase que se buscam alternativas de manejo de rios urbanos, em detrimento das canalizações e retificações;
- desenvolvimento sustentável: fase iniciada na década de 90 em decorrência da persistência da contaminação de corpos hídricos via poluição difusa. Nesta fase, buscam-se alternativas sustentáveis de drenagem, armazenagem e uso de águas pluviais, tratamento e reuso de águas residuais, bem como tratamento de águas pluviais drenadas das áreas pavimentadas para posterior disposição no corpo hídrico.

Quanto às canalizações e retificações em rios cabe destacar que, durante muito tempo, estas foram ou continuam sendo práticas bastante comuns em projetos de engenharia hidráulica e fluvial. A retificação é adotada de modo a transformar os leitos dos rios em perfis regulares, extinguindo configurações meândricas, aumentando a velocidade de escoamento das águas, encurtando o comprimento dos canais e deixando mais espaço para a urbanização, evitando temporariamente possíveis inundações (BINDER, 2001). Rios meandantes por vezes são tomados como sinônimo de transtorno, pois diminuem a área urbana útil para ocupação. No Brasil centenas de rios foram canalizados e/ou retificados em nome da adequação dos cursos d'água ao crescimento da malha urbana.

De modo geral, rios e córregos podem ser retificados e canalizados com ou sem concreto, ou ainda podem passar por dutos e galerias subterrâneas. As três opções, ao tornar os perfis dos canais regulares, provocam profundas

alterações no regime natural de escoamento. Devido a tais alterações, as águas atingem ponto o exutório das bacias mais rapidamente e de forma mais concentrada, resultando na redução do tempo de concentração da água (BINDER, 2001).

A primeira modalidade (retificação sem concreto) tem por consequência a acentuação dos processos erosivos nas margens e leitos dos rios e córregos, em função do aumento da velocidade das águas causado pelas retificações.

Segundo Botelho (2011), cursos d'água, independentemente da interferência humana, realizam três processos geomorfológicos básicos: erosão, transporte e deposição, construindo, desta forma, seu próprio perfil de equilíbrio dinâmico. Qualquer intervenção feita em seu leito ou área de drenagem altera sua situação de equilíbrio. À jusante de um canal retificado verifica-se, quase sempre, aumento da carga sólida e imediato assoreamento (CUNHA, 1994).

As modalidades de retificação e canalização com concreto restringem atividades de erosão e deposição nas áreas de várzea e impossibilitam a formação e manutenção de espaços para assentamento da biodiversidade aquática (POFF, 1997). Além disso, rios canalizados subterrâneamente ficam “invisíveis” aos olhos da população, tornando-os elementos esquecidos e pouco preservados. Por estarem “escondidos”, é neles que ocorre maior número de despejo clandestino de esgoto, como é o caso do rio Belém, em seu trecho canalizado subterrâneamente no centro de Curitiba/PR (RETRATOS, 2015).

A evolução dos estudos em drenagem urbana evidencia que ela é composta por problemas e processos complexos, sendo atualmente definida como (PORTO *et al.*, 2014 p. 805):

Conjunto de medidas que tenham por objetivo minimizar os riscos que as populações estão sujeitas, diminuir os prejuízos causados por inundações e possibilitar o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável.

A eficácia do sistema de drenagem depende essencialmente da elaboração, por parte do poder público, de planos diretores de drenagem urbana, que tracem o planejamento hídrico a curto, médio e longo prazo. Tal

planejamento deve ser realizado com base na simulação do cenário hídrico atual e simulação de cenários futuros, com elaboração e aplicação de políticas públicas. Para isso, faz-se essencial a implementação de lei de zoneamento para uso e ocupação do solo, articulada com o plano de drenagem. Faz-se necessária também a existência de uma instituição capaz de realizar pesquisas, obras e inspeção e também a realização de campanhas educacionais para a população (TUCCI, 2008).

A realidade de muitas cidades, no entanto, configura-se com inexistência de planos diretores de drenagem urbana. Tucci (1997) sinaliza que a ausência de controle e gestão pode levar a cidade ao caos, dado desequilíbrio do balanço hídrico, crise hídrica, intensificação de enchentes e poluição dos corpos d'água.

2.1.2.1 Inundações

Dentre os impactos gerados pela má gestão, ineficiência ou ausência do plano diretor de drenagem urbana, as inundações se apresentam como as grandes causadoras de prejuízos financeiros e perdas humanas⁴, especialmente em países em desenvolvimento (BOTELHO, 2011). Lima (2010) destaca que o transbordamento de canais fluviais é um fenômeno natural, característico das áreas do baixo curso dos rios, responsável pela formação de planícies e terraços aluviais. A Figura 3 ilustra as seções transversais de um rio hipotético em seu baixo curso.

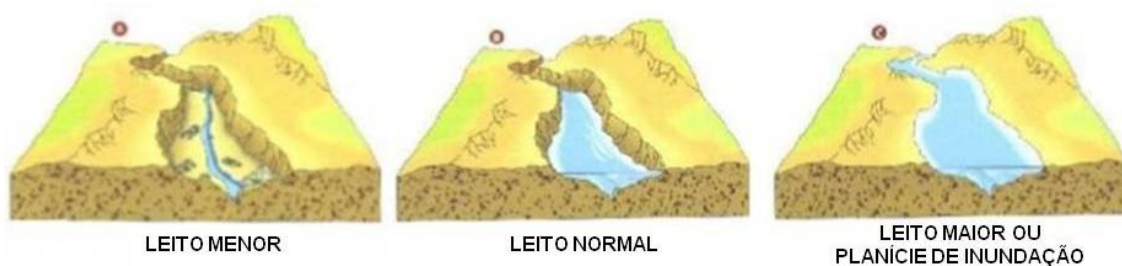


FIGURA 3 LEITOS DO RIO

⁴ As perdas humanas podem ser ocasionadas por efeitos diretos – como afogamentos – ou indiretos – como contração de doenças infecciosas decorrentes do contato com a água contaminada (BOTELHO, 2011).

O leito menor corresponde à área do canal fluvial ocupada por água em períodos de estiagem. O leito normal, como o próprio nome indica, corresponde à área por onde normalmente a água flui em períodos medianos. O leito maior, ou planície de inundação equivale à área inundada em períodos chuvosos, definido através de cálculo com base na escolha do tempo de retorno para eventos relevantes (LIMA, 2010). As inundações ocorrem quando as águas saem de seu leito normal e tomam a planície de inundação.

As cheias dependem das condições do meio físico das bacias hidrográficas, tais como: forma da bacia, densidade de drenagem, tempo de concentração⁵, geometria dos canais fluviais, formas de relevo, substrato geológico, cobertura pedológica, tipo e densidade da cobertura vegetal (CHRISTOFOLETTI, 1981). Em áreas urbanas, com a inserção de elementos antropogênicos, como já visto, tais condições se somam e interagem com a composição do uso da terra, rede de drenagem e ocupação de áreas inundáveis (TUCCI, 2001).

Planícies de inundação são elementos constituintes da área ativa dos rios, o que indica que estas áreas não devem ser ocupadas (SMITH, 2008; LEOPOLD, 1996), fato este que não se observa nos grandes centros urbanos (FIGURA 4). A falta de planejamento das cidades favorece ocupação de áreas ribeirinhas, especialmente por populações com perfis socioeconômicos desfavorecidos, tornando-as mais vulneráveis ao risco de enchentes, como sinalizam Marandola Jr. e Hogan (2009).

⁵ Tempo de concentração é o tempo que uma partícula de água leva para atingir a seção de referência da bacia hidrográfica – de uma de suas extremidades até o ponto exutório (LIMA, 2010).

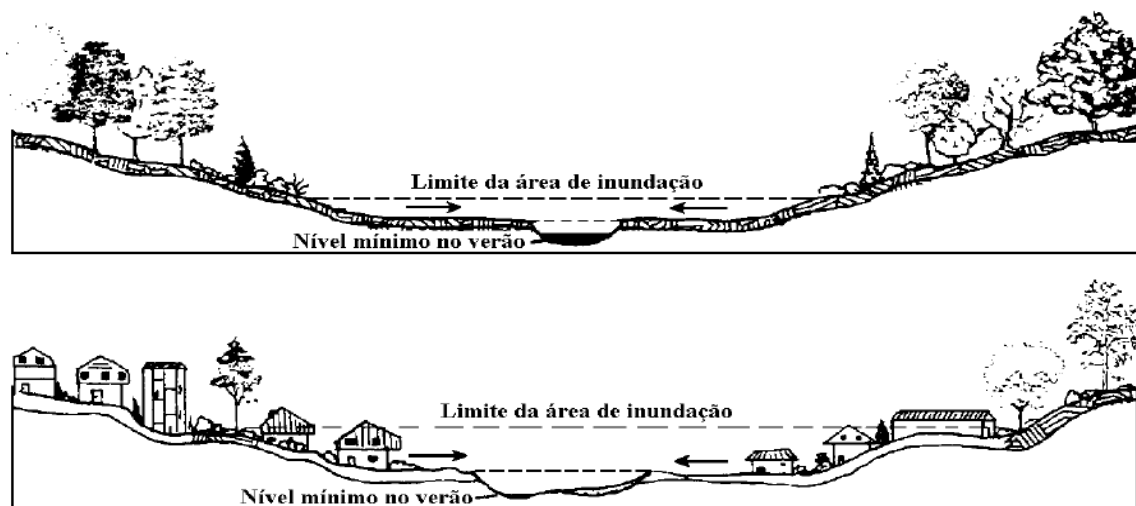


FIGURA 4 ÁREA DE INUNDAÇÃO EM AMBIENTE URBANIZADO E NÃO URBANIZADO
 FONTE: TUCCI (1997A P.6)

O risco eminente de enchentes nestas áreas é evidente. No entanto, a omissão do poder público, a falta de planejamento, crescimento urbano desordenado e desinformação da população fazem com que seja tão comum a ocupação de tais áreas e ocorrência de fatalidades (TUCCI, 2001).

À questão da ocupação de áreas ribeirinhas soma-se o aumento dos índices de escoamento superficial e picos de vazão máxima devido à impermeabilização do solo, retificação e canalização de rios, ineficiência da rede de drenagem e assoreamento dos corpos d'água (TUCCI, 2001). Os impactos da urbanização em eventos de precipitação podem ser facilmente identificados no hidrograma (FIGURA 5), que evidencia a diminuição no tempo de concentração da água na bacia e maior volume e velocidade de escoamento da água nos canais.

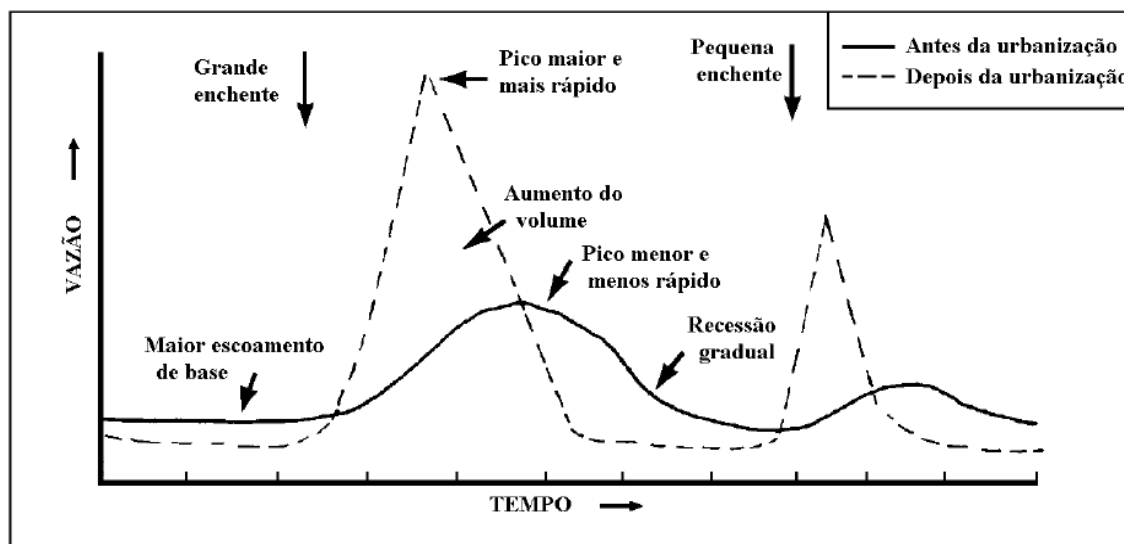


FIGURA 5 IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO HIDROGRAMA
 FONTE: TUCCI (1997A P.6)

Tucci e Collischonn (1998, p. 15) atestam que, frente às fatalidades dos eventos “naturais”, como as inundações urbanas ou outras questões ligadas má gestão dos recursos hídricos, costuma-se adotar posturas de resignação, quando na realidade, o impacto foi gerado pela urbanização inadequada.

2.1.2.2 Crise hídrica

A escassez de água é, atualmente, um problema com o qual muitos países precisam conviver. Estima-se que cerca de 40% da população mundial viva hoje sob a situação de estresse hídrico, devido a diferentes causas e problemas. Neste trabalho, dá-se ênfase aos problemas de escassez, agravados ou decorridos da urbanização.

O contínuo crescimento dos centros urbanos faz aumentar, cada vez mais, a demanda por água potável. Em contrapartida, o acelerado acréscimo de áreas impermeáveis, traz importantes alterações à dinâmica hídrica das bacias hidrográficas, com a diminuição da infiltração da água no solo, recarga do nível freático, diminuição de vazões e, conseqüentemente, dos níveis dos reservatórios destinados ao abastecimento público. Tundisi (2008) e Jacobi (2015) apontam que, especialmente no Brasil, a crise no abastecimento de

água está, na realidade, mais atrelada ao seu mau gerenciamento do que ao real estresse hídrico.

2.1.3 Controle de impactos e desenvolvimento sustentável

“Há poucas palavras mais usadas hoje do que o substantivo sustentabilidade e o adjetivo sustentável” (BOFF, 2015 p.9). Infelizmente, utiliza-se amplamente o termo como uma etiqueta que se insere aos produtos para lhes agregar valor, quando na realidade a maioria daquilo que se enuncia como sustentável geralmente não o é. Sabendo que a manutenção da vida depende da harmonia com o meio (TUCCI, 2008), e diante dos cenários de degradação ambiental com enfoque no ambiente urbano anteriormente expostos, torna-se necessária a promoção de debates coerentes acerca do desenvolvimento sustentável e controle de impactos da ação humana sobre o meio. Boff (2015) sugere uma discussão a respeito de uma sustentabilidade real, que deve ser debatida, praticada e globalizada.

O termo sustentabilidade tem raiz na palavra latina *sustentare*, que significa manter-se e conserva-se sempre bem. Em termos ecológicos, refere-se à manutenção e fortalecimento dos ecossistemas (solo, água, biodiversidade).

O conceito, ao contrário do que muitos imaginam, tem origem na Alemanha, há cerca de 400 anos. Ganha, no entanto, maior relevância ao longo dos encontros mundiais sobre sustentabilidade e meio ambiente - Estocolmo (1972), Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1984), Conferência da Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio de Janeiro, 1992), Rio+5 (1997), Cúpula da Terra sobre Sustentabilidade e Desenvolvimento (Johanesburgo, 2002) e Rio+20 (2012) (BOFF, 2015).

No âmbito do presente trabalho, a sustentabilidade aponta para a reintegração da água em meio urbano (POMPEO, 2000). Jacobi *et al.* (2015) sinalizam que a qualidade ambiental de rios e córregos urbanos são elementos centrais para garantir a sustentabilidade das cidades. Tendo em vista as

variadas e intensas intervenções antrópicas no sistema hidrográfico nas cidades, como a impermeabilização do solo, alteração dos leitos dos rios e depreciação da qualidade das águas, faz-se necessária a adoção de novos paradigmas e conceitos que sejam capazes de garantir um melhor funcionamento das bacias de drenagem. A este contexto se acrescenta a discussão sobre gestão do uso e ocupação do solo, com aumento de áreas permeáveis, alternativas de armazenamento e uso de águas pluviais, tratamento e reuso de águas residuais, bem como a recuperação de rios degradados.

2.1.3.1 Aumento e manutenção de áreas permeáveis

O aumento ou a manutenção de áreas permeáveis em áreas urbanas pode ser uma medida fundamental e eficaz para auxílio na contenção de enchentes, com a diminuição do escoamento superficial e aumento da infiltração da água no solo (SOUZA *et al.*, 2012). Aumentando o tempo de permanência da água na bacia, diminuem-se os picos de vazão máxima em eventos de precipitação e se propicia a manutenção do reabastecimento do nível freático. Tucci (1997a) reitera que, sendo a bacia um agente sistêmico, não se deve insistir na prática da transferência de impactos para jusante.

A implementação de canteiros e gramados laterais nas ruas, valas de infiltração, dispositivos hidráulicos e pavimentos permeáveis, são medidas cabíveis ao aumento de áreas de infiltração da água no solo. Em relação ao controle de permeabilidade dos lotes, tanto em áreas urbanas já consolidadas, quanto em áreas de expansão, Tucci (2000) sugere a aplicação de leis de zoneamento e planos diretores que incluam o controle e especialmente fiscalização da impermeabilidade dos lotes, com porcentagens mínimas de permeabilidade exigidas para cada zona da cidade.

2.1.3.2 Uso de águas pluviais e reuso de águas residuais

Quando analisadas as possíveis alternativas de reuso de águas pluviais e residuais, verifica-se que se tratam medidas muito interessantes para centros urbanos, tanto para contenção do escoamento superficial, quanto para diminuição do volume de demanda de água importada.

Entretanto, a alternativa mais simples e conhecida, na escala residencial, é a utilização de cisternas, que nada mais é que um reservatório de águas pluviais, direcionada ao uso não potável, útil, por exemplo para irrigação de jardins e descargas de banheiros. Tanques de águas pluviais podem ser implementados também em escalas maiores, com a captação de águas pluviais provenientes de uma dada região ou bairro.

Há também a alternativa de instalação de tanques de armazenamento e tratamento de águas residuais, cujo reaproveitamento de água pode ser direcionado também à irrigação ou à descarga dos banheiros. Tanques de armazenamento e tratamento de águas residuais podem ser construídos em diferentes escalas - residencial ou regional.

2.1.3.3 Revitalização e renaturalização de rios e bacias hidrográficas

Segundo Machado (2008), o processo de revitalização de rios depende de uma série de ações de preservação, conservação e recuperação ambiental no âmbito da bacia hidrográfica. O objetivo da revitalização é proporcionar a melhoria na qualidade das águas para usos múltiplos por meio de ações permanentes, como a despoluição de esgotos, gestão integrada de resíduos sólidos e educação ambiental (AFONSO, 2011).

Para revitalizar um rio é comum que se façam cortes pontuais de poluição e que se reestabeleça corredor de mata ciliar. O alcance das medidas revitalizantes é indicado pela melhoria da qualidade da água dos rios (MACHADO, 2008). Revitalização é uma prática bastante difundida. Existem vários projetos de revitalização de rios em andamento no Brasil e no mundo. Alguns exemplos de sucesso são o rio Senna (Paris/França) e o rio Tâmbisa (Londres/Inglaterra). No Brasil existem projetos de revitalização para

importantes rios como rio das Velhas, rio São Francisco, rio Tietê e até mesmo o rio Belém. Poucos projetos, no entanto, obtiveram sucesso.

O conceito de renaturalização tem sido amplamente aplicado aos rios urbanos. Em alguns estudos, começa também a ser aplicado sob a perspectiva da bacia hidrográfica, com a intenção de renaturalizá-la de modo a reestabelecer o equilíbrio da dinâmica hídrica (CARVALHO, 2013). A adoção da bacia de drenagem como área de estudo, segundo visão holística e sistêmica, sublinha o fato de que não é possível conhecer o funcionamento de um rio, sem antes atentar para o que se dá em seu entorno (CASSETI, 2002).

Estudos como de Botelho (2011), Calderari (2012), Lima (2012), Brocanelli (1995) e Afonso (2011) sugerem a busca de uma urbanização menos desnaturalizante, que possibilite o reencontro da natureza nas cidades por meio da implementação de projetos de renaturalização de rios e bacias de drenagem.

Além dos aspectos já inclusos no processo de revitalização, a renaturalização propõe a recomposição dos substratos dos rios e de suas margens por meio de iniciativas que utilizem materiais naturais, recomposição da biota aquática, conservação de áreas naturais de inundação, reconstrução de meandros, reestabelecimento de vegetação na bacia e nas margens dos cursos d'água (BINDER, 2001). Muitos dos projetos de renaturalização já implementados, agiram inicialmente com a remoção dos diques de concreto, para possibilitar a reconstituição de cursos menos “domesticados” e retilíneos, ou seja, em direção contrária às obras de retificação e canalização de rios, aumentando o tempo de permanência da água na bacia (CARVALHO e SANTOS, 2013-a).

De acordo com Souza e Kobiyama (2003) a renaturalização não significa o retorno do rio ou bacia ao seu estado original, mas a busca do reequilíbrio de seus sistemas naturais e de seu desenvolvimento sustentável. Medidas renaturalizantes servem, em primeiro lugar, para melhorar a qualidade de vida da população urbana com aprimoramento das condições ecológicas e conservação das águas (KOBİYAMA, 2008). As vantagens da aplicação das medidas renaturalizantes são: redução dos picos de cheia e dos processos erosivos fluviais, melhoria na qualidade da água, reestabelecimento do

ecossistema, ampliação de áreas verdes, criação de novos espaços de lazer com resgate de áreas de uso para a população.

Pouco se sabe sobre os impactos da renaturalização em meio urbano (LIMA, 2012). Uma vez que desconstruir as cidades é algo incabível e ilusório, é preciso propor intervenções que produzam menor impacto na malha urbana ou até mesmo que criem mecanismos alternativos que possam substituir alguns processos hidrológicos fundamentais, como é o caso da infiltração da água no solo. Expandindo o tempo de chegada das águas no final de cada sistema hidrográfico, diminuem-se os picos de vazão máxima e os gradientes erosivos (BOTELHO, 2011).

Muitos de projetos de renaturalização de rios e córregos foram ou estão sendo desenvolvidos no Brasil e no mundo. Os exemplos mais expressivos estão na Alemanha, tendo em vista que este foi o país pioneiro em estudos e elaboração de projetos práticos (CARVALHO, 2013; CARVALHO e SANTOS, 2013-a). Botelho (2012), Luderitz, *et al.* (2004) e Binder (2008) apresentam exemplos dos rios Lech e Vils, rio Ihle e rio Isar, respectivamente, todos alemães, que obtiveram sucesso em seus projetos executados. No Brasil, à exemplo, os rios Tijuco Preto (São Paulo-SP), Vargem Pequena (Campo dos Goytacazes-RJ) e riacho do Ipiranga (São Paulo-SP) vêm sofrendo também intervenções desta ordem.

O trabalho de Carvalho e Santos (2013-b) sinaliza que a renaturalização surge como um conceito que objetiva, portanto, aproximar o homem do ambiente fluvial, fazendo com que ele enxergue o rio como um bem e não um problema. Desta forma, os rios podem ser reintegrados à paisagem urbana como um elemento positivo.

2.1.4 Cenário brasileiro de águas urbanas

Assim como o restante no mundo, o Brasil vem se tornando um país cada vez mais urbano. Com aproximadamente 83% da população habitando as cidades, concentra nestes espaços não apenas um grande contingente populacional, mas também problemas ambientais e estruturais devido à falta de

planejamento e ocupação desordenada (TUCCI, 2008; PORTO *et al.*, 2014; TUCCI, 2001). É fato que, em geral, o acréscimo da população urbana se dá em descompasso com investimentos em infraestrutura, gerando pressão sobre os recursos naturais e precarização da qualidade de vida. Jacobi (2004) sinaliza que, no contexto brasileiro, os problemas ambientais urbanos se avolumam rapidamente, ao passo de sua lenta resolução.

Diferente dos cenários de gestão de águas urbanas encontrados em países desenvolvidos, como Alemanha, França, Austrália e EUA, o Brasil encontra-se imerso em problemas ligados ao saneamento básico, controle de inundações e poluição de corpos hídricos. Ressalta-se que o padrão brasileiro de apropriação do espaço favorece o agravamento de problemas ambientais (Jacobi, 2004). Enquanto que os países anteriormente citados encontram-se na fase do desenvolvimento sustentável de drenagem urbana (item 2.1.2), o Brasil ainda permanece na fase higienista, devido à falta de tratamento de esgoto, transferência de inundações na rede de drenagem e falta de controle de resíduos sólidos (TUCCI, 2008).

Dada revisão de literatura realizada sobre Hidrologia Urbana, é possível identificar que no Brasil são realizados estudos especialmente voltados à drenagem urbana, abastecimento público e qualidade da água, devido à problemática latente das enchentes urbanas, saneamento básico, escassez de água nos reservatórios, assoreamento de rios, danos ambientais e doenças de veiculação hídrica. São encontrados também alguns estudos científicos e projetos, desenvolvidos em diferentes escalas espaciais, a respeito da revitalização de rios. Em pequena escala, são encontradas pesquisas sobre renaturalização e menos ainda sobre armazenagem e uso de águas pluviais ou tratamento e reuso de águas residuais. Em contrapartida, as pesquisas internacionais de países desenvolvidos concentram-se nos temas ligados a práticas sustentáveis, como a renaturalização de rios e alternativas de reuso de águas pluviais e residuais.

A falta de tratamento de efluentes é um problema bastante relevante no Brasil. Levantamentos de 2004 do SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - apontavam que apenas 77,22% era coletado e que apenas 28,2% gerado no país recebia tratamento. O montante não tratado é, portanto, lançado diretamente nos corpos hídricos dos centros urbanos. Em

função disso, nota-se que os rios que cortam as cidades brasileiras se encontram com a qualidade de suas águas altamente comprometidas, apresentando baixos níveis de oxigênio dissolvido (*OD*), e altas concentrações de coliformes termotolerantes. Jacobi (2004) aponta que cerca de 2/3 da contaminação dos cursos d'água urbanos provém do despejo de efluentes não tratados.

De acordo com a NBR 9649 (ABNT, 1986) é regulamentado no Brasil o sistema de esgotamento sanitário separador absoluto, caracterizado pela separação total de esgoto e drenagem pluvial. Neste sistema, que oferece menor custo de gestão, a estação de tratamento de efluentes deve receber apenas o volume de esgoto produzido, enquanto que as águas pluviais devem destinar-se ao sistema de drenagem urbana. TSUTIYA e SOBRINHO (2011, p.4) enfatizam que:

(...) para o sucesso do sistema de esgoto sanitário implantado é necessário um eficiente controle para se evitar que a água pluvial, principalmente proveniente dos telhados e pátios das economias esgotadas, seja encaminhada junto com as águas residuárias para esse sistema de esgoto.

O Brasil, no entanto, necessita de tal eficiência no controle. Devido a um grande número de ligações clandestinas de águas pluviais na rede de esgoto e também à grande quantidade de fissuras existentes na tubulação, que a torna suscetível a infiltrações, as estações de tratamento de efluentes recebem, em geral, um grande volume de águas pluviais em períodos de chuva, provocando sobrecarga e extravazamento das estações de tratamento (BERTOLINO, 2013).

Ressaltam-se ainda os problemas crônicos existentes nos serviços de abastecimento de água, tais como a falta de proteção de mananciais (devido ao descontrole do uso e ocupação do solo), perda de água na distribuição, efluentes despejados nos rios, esgoto pluvial, contaminação do freático, resultando em crise de abastecimento público. Tal crise é vivenciada por grandes centros urbanos no Brasil, como é o recente caso da cidade de São Paulo e de sua região metropolitana, que vêm sofrendo nos anos de 2014, 2015 e 2016 sérios problemas de escassez, com racionamento de água em

larga escala e utilização do volume morto de seus reservatórios. Reitera-se novamente as pesquisas de Tundisi (2008) e Jacobi (2015), que chamam atenção ao fato de a crise hídrica brasileira estar mais ligada à questão do gerenciamento do que ao real estresse hídrico. Porto *et al.* (2014) sinalizam também que a política brasileira não prioriza projetos de médio e longo prazo em relação à gestão hídrica, contribuindo no agravamento de tais problemas. Há um quadro de ineficácia ou ausência de políticas públicas para enfrentamento de problemas ligados à gestão de recursos hídricos.

Em relação ao trato dos rios em meio urbano, priorizam-se ainda hoje as práticas de canalização e retificação de rios, bem como o aterramento de várzeas para incorporação de área à malha urbana, o que provoca a transferência de problemas à jusante, como inundações e aumento carga de poluentes na água (TUCCI, 1997-b).

2.2 MODELAGEM DO BALANÇO HÍDRICO URBANO

A modelagem é um importante instrumento dentre os procedimentos metodológicos da pesquisa científica, especialmente no campo das ciências naturais (CHRISTOFOLETTI, 1999). A modelagem de sistemas ambientais se desenvolveu em função da necessidade de compreensão dos diferentes fenômenos naturais, dada complexidade da natureza e a impossibilidade de medição de todos os seus fenômenos. No caso específico da Hidrologia, onde há carência ou inexistência de registro de dados, buscam-se modelagens com escalas de tempo e espaço mais amplas, utilizando-se de modelos de simulação para gerar sequências artificiais de dados para serem utilizados em pesquisas e tomadas de decisão (tais como controle de cheias, construção de barragens e abastecimento público).

Composta por uma ampla gama de instrumentação tecnológica, a modelagem favorece ampliação na obtenção de dados, compreensão, diagnóstico e manejo dos sistemas ambientais, compondo um quadro simplificado e inteligível do mundo, configurando-se como um importante instrumento de planejamento. Conforme aponta Christofoletti (1999), os

modelos podem assumir formulação qualitativa – apropriando-se de termos lógicos – ou quantitativa – apropriando-se de termos matemáticos.

Ainda segundo Christofolletti (1999), modelos devem possuir caráter seletivo (incluindo em sua estrutura apenas informações essenciais, a fim de eliminar detalhes acidentais), estruturado (apresentando múltiplas relações entre os aspectos representados, de modo sistêmico), enunciativo (oferecendo implicações suficientemente ricas para sugerir novas hipóteses), análogo (pois geram analogias no mundo real) e reaplicável (caráter genérico, para que possa ser aplicado em diferentes áreas de estudo).

Lima (2010) aponta que, de modo geral, um modelo pode ser compreendido como representação simplificada da realidade. Representação esta que possibilita a provisão de certos comportamentos, transformações ou evoluções da paisagem, seguindo leis mais simples do que um sistema real para obtenção de resultados aproximados. Tais leis, que procuram simular a natureza, podem ser expressas matematicamente (modelos matemáticos) ou fisicamente (modelos físicos, aplicados em pequenas escalas dentro de laboratórios). Christofolletti (1999, p. 8) aponta a definição do termo *modelo* de Hagget e Chorley (1967;1975) como sendo a mais adequada:

Modelo é uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade.

Erros são inerentes à modelagem. Ao simular fenômenos da natureza em modelos matemáticos, é-se forçado a aceitar certas condições que simplifiquem o problema de forma a torná-lo tratável. Os melhores modelos são os que incluem apenas características do problema real necessárias para reduzir os erros a um nível aceitável (LIMA, 2010).

Retomando a questão dos modelos hidrológicos, cabíveis à presente dissertação, destacam-se os modelos matemáticos de simulação. Os modelos matemáticos são alimentados por variáveis e parâmetros, que se inserem nas estruturas algorítmicas do programa computacional para calcular as respostas

hidrológicas em um dado sistema e período de tempo (LIMA, 2010). Viessman e Lewis (1996) apresentam a seguinte chave classificatória de tipologias de modelos matemáticos de simulação:

- Quanto à forma de representação dos dados: modelos *contínuos* - estabelecem a modelagem contínua dos processos envolvidos – ou modelos *discretos* – fragmentam as informações espaciais e temporais em segmentos de determinada grandeza;
- Quanto à escala temporal: *dinâmicos* – contém processos que envolvem mudanças ao longo do tempo - e *estáticos* – examinam processos independentes do tempo;
- Quanto à estrutura dos fenômenos: *descritivos* – baseiam-se no empirismo – ou *conceituais* – baseiam-se em concepções teóricas;
- Quanto às variações espaciais: *genéricos* – não consideram variações espaciais dos parâmetros do sistema – ou *distribuídos* – consideram variações espaciais dos parâmetros do sistema;
- Quanto aos tipos de variáveis utilizadas: *estocásticos* – utilizam técnicas para lidar com eventos de caráter aleatório a partir da lei das probabilidades - ou *determinísticos* – também chamados de modelos chuva-vazão, representam o sistema físico natural sem aplicação da lei das probabilidades;
- Quanto à finalidade: modelos *de balanço hídrico* ou *preditivos* – predição de condições futuras com base em séries de dados históricos.

Frente às interferências da urbanização no ciclo urbano da água, anteriormente discutidas, e à necessidade de uma melhor gestão e planejamento dos recursos hídricos urbanos, modelos voltados à quantificação de balanço hídrico em ambientes urbanos foram desenvolvidos, tais como *Aquacycle*, *UQV* e *SWITCH*.

Dentre tais modelos, o *Aquacycle* foi o primeiro a ser desenvolvido, sendo, portanto, o modelo que possui maior quantidade de aplicações em trabalhos científicos. O *Aquacycle* realiza modelagem diária de balanço hídrico urbano (MITCHELL, 2005). Desenvolvido poucos anos após o *Aquacycle*, o modelo *UQV* calcula não apenas o balanço hídrico urbano, mas também a concentração de contaminantes na rede de drenagem (MITCHELL & DIAPER, 2005). O modelo *SWITCH*, por sua vez, é baseado na estrutura conceitual do *Aquacycle* e do *UQV*, incluindo os dois em uma mesma estrutura de

modelagem, além de incluir o balanço energético e análises de custos nos dados de saída (LAST & MACKAY, 2007).

Atualmente, apenas o *Aquacycle* encontra-se disponível ao público para utilização. Em razão disso, e dadas as suas características estruturais, foi o modelo escolhido como instrumento metodológico do presente trabalho.

Considerando a chave de classificação de modelos hidrológicos de Viessman e Lewis (1996), *Aquacycle* pode ser classificado como um modelo matemático de balanço hídrico, discreto, dinâmico, conceitual, distribuído, estocástico e contínuo. A seção seguinte (2.3) e o item 3.4 apresentam maiores detalhes sobre sua estrutura de modelagem, com a descrição básica do modelo e sua descrição matemática, respectivamente.

2.3 AQUACYCLE

O *Aquacycle* é um modelo de balanço hídrico urbano diário desenvolvido por Grace Mitchell - departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Melbourne, Austrália - para simular o ciclo urbano da água como um todo integrado. Destinado à comunidade preocupada com a gestão de recursos hídricos urbanos e com a utilização de águas pluviais e reutilização de águas residuais, foi desenvolvido no ano de 2001 e disponibilizado ao público em 2005. O modelo foi desenvolvido com base no conceito de balanço hídrico urbano, considerando que este se trata de um conceito chave para a compreensão do ciclo urbano da água (SITUMORANG, 2008).

Seus propósitos são: 1) caracterizar o fornecimento de águas pluviais e residuais urbanas em termos de quantidade e distribuição temporal e espacial; 2) determinar os critérios de demanda dos diferentes usos da água urbana em termos de quantidade e padrão temporal e espacial; 3) fornecer uma ferramenta para avaliar o desempenho de esquemas alternativos para uso de águas pluviais e reuso de águas residuais (MITCHELL, 2005). O *Aquacycle* não fornece dados de qualidade de água, diferente dos modelos *UQV* e *SWITCH*. Portanto, não há previsão para usos potáveis em alternativas de reaproveitamento de água.

Segundo Mitchell, Mein e McMahon (2001), abastecimento público, rede de drenagem de águas pluviais e residuais raramente são utilizados em uma mesma estrutura de modelagem. Tendo em vista a necessidade de se adotar uma visão mais holística ao sistema de águas urbanas, este modelo foi criado abrangendo todos estes parâmetros.

O *Aquacycle* utiliza-se de três escalas espaciais: blocos, *clusters* e bacia de drenagem (FIGURA 6). Um bloco representa a menor unidade possível para gestão de água: o lote. Os blocos são divididos entre jardins, telhados e áreas pavimentadas, onde o primeiro é considerado área permeável e os dois últimos impermeáveis. A modelagem na escala bloco permite que se identifiquem os efeitos cumulativos de ações individuais, especialmente no que se refere ao aproveitamento de águas pluviais e reuso de águas residuais.

Um *cluster*, por sua vez, representa um conjunto de blocos. À sua área é acrescida a contabilização das ruas (impermeável) e espaço aberto público (permeável). São considerados espaços abertos públicos os parques, praças e canteiros, revestidos de gramados e/ou outros tipos de vegetação. Os *clusters* são delimitados segundo critérios de quem se utiliza do modelo, considerando as particularidades da área de estudo escolhida. Em alguns casos, adotam-se critérios político-administrativos, como divisão de bairros ou regionais. Na maioria dos casos, no entanto, os *clusters* são delimitados a partir da identificação de áreas de similaridade hidrológica, que possuam padrões correlatos no uso da terra, densidade demográfica, relevo e uso de água.

Por fim, bacia de drenagem é a área de estudo em si, ou seja, o conjunto de *clusters*. O modelo *Aquacycle* comporta até no máximo a inserção de 50 *clusters* por bacia de drenagem.

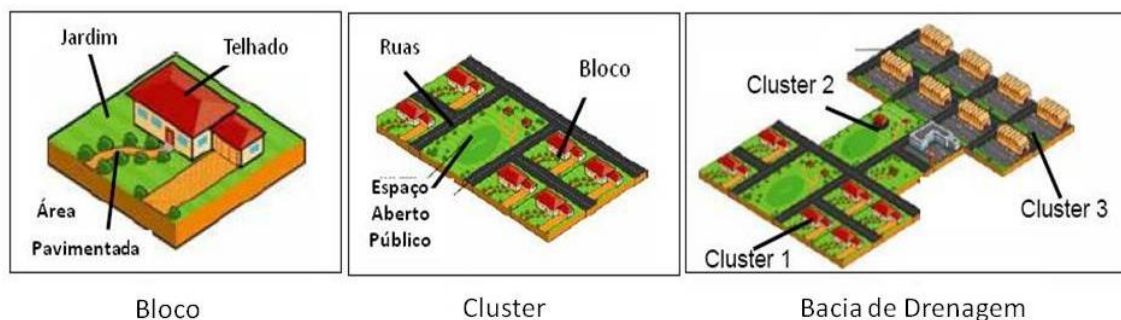


FIGURA 6 ESCALAS ESPACIAIS UTILIZADAS NO AQUACYCLE

FONTE: ADAPTADO E TRADUZIDO DE MITCHELL, MEIN E MCMAHON, 2001

Para rodar o modelo, o *Aquacycle* exige a entrada de diferentes tipos de dados, reunidos em 8 grupos, conforme abaixo:

Grupo 01) Perfil de uso de água: Fornece dados sobre o uso doméstico da água, indicando média de consumo por residência, de acordo com o número de moradores, em cada um dos cômodos da casa. O mesmo perfil de uso da água é utilizado para todos os *clusters*.

Grupo 02) Dados climáticos: Contém série de dados históricos diários de precipitação e evapotranspiração potencial. O programa está limitado ao máximo de 100 anos de dados climáticos.

Grupo 03) Blocos: O arquivo *blocos* é formado por uma sequência de 33 dados, que contém detalhes sobre a existência e perfil de uso de tanques de aproveitamento de águas pluviais ou reaproveitamento de águas residuais na escala bloco dentro de cada *cluster* simulado. Contém também informações referentes ao volume de água destinado à prática de irrigação de jardins com água importada. Para cada *cluster* é feita uma média de dados de seus respectivos blocos.

Grupo 04) *Clusters*: Formado por uma sequência de 19 dados que descrevem a existência e perfil de uso de tanques de aproveitamento de águas pluviais ou reaproveitamento de águas residuais na escala *cluster*.

Grupo 05) Bacia de drenagem: Formado por uma sequência de 8 dados referentes à área da bacia, existência, dimensões e capacidade de armazenamento de tanques de águas pluviais e residuais na escala bacia de drenagem.

Grupo 06) Parâmetros medidos: Sequência de 14 dados referentes ao uso da terra na escala *cluster*. Os parâmetros medidos não se alteram durante a calibração.

Grupo 07) Parâmetros de calibração: Sequência de 16 dados para calibração relativos às características físicas da área modelada. 11 destes parâmetros referem-se a escoamento de águas pluviais, 03 a escoamento de águas residuais, e 02 ao uso da água. O modelo não possui auto-calibração. Trata-se de um processo manual de tentativa e erro.

Grupo 08) Níveis iniciais de armazenamento: Sequência de 05 dados relativos aos níveis iniciais de armazenamento de água nos tanques de águas pluviais e residuais nas escalas bloco e *cluster*.

Com os dados de entrada e algoritmos subjacentes ao modelo, *Aquacycle* gera simulações de balanço hídrico diário, mensal ou anual – com estimativas da contribuição de águas pluviais, contribuição de águas residuais, evapotranspiração, uso da água importada, uso de águas pluviais, reuso de águas residuais e demanda de água - nas três escalas de trabalho: bloco, *cluster* ou bacia de drenagem. Tendo em vista a busca por formas de mitigar os efeitos da urbanização no ciclo hidrológico, o modelo possui uma ferramenta de simulação de tanques de aproveitamento de águas pluviais e tanques de reaproveitamento de águas residuais.

Ressalta-se que os valores gerados nas simulações do *Aquacycle* são aproximações da realidade, tendo em vista as deficientes caracterizações microclimáticas e fisiográficas das bacias urbanas, as incertezas hidrológicas dos processos envolvidos e as simplificações dos métodos disponíveis

2.4 APLICAÇÕES DO MODELO AQUACYCLE

Esta seção da pesquisa elenca alguns dos trabalhos que já se utilizaram do modelo *Aquacycle*. Buscou-se compreender de que maneiras o modelo tem sido utilizado em trabalhos científicos, identificando as principais características das áreas de estudo selecionadas (tais como extensão e população residente), bem como a série de dados climáticos utilizada e quantidade de *clusters* vetorizados (TABELA 1). Buscou-se elencar também os objetivos e principais resultados obtidos nas pesquisas (TABELA 2). A análise de tais dados propiciou a verificação da aplicabilidade do modelo na área de estudo da presente pesquisa e dos critérios metodológicos adotados nos estudos anteriores.

Ao todo foram analisados oito trabalhos, dentre os quais seis são artigos e dois dissertações de mestrado. Dentre os títulos prevalecem referências à modelagem de balanço hídrico urbano, efeitos da urbanização no balanço hídrico e alternativas para uso de águas pluviais e reuso de águas residuais.

O primeiro material analisado é da própria autora do modelo. Mitchell, Main e McMahon (2001) apresentam um primeiro teste do *Aquacycle*, feito na bacia de Woden Vale, Canberra-Austrália. Nesta ocasião, o modelo foi capaz

de executar simulações de balanço hídrico de modo satisfatório, no entanto, necessitava ainda de outros testes em bacias hidrográficas com características distintas (clima, geomorfologia, uso da água, dentre outros). Os demais trabalhos abaixo descritos, grosso modo, podem ajudar a preencher esta lacuna ora exposta pelos autores, pois aplicam o modelo em áreas bastante heterogêneas, inseridas nos cinco diferentes continentes: Oceania (Austrália), Europa (Grécia e Espanha), Ásia (Coreia), África (Gana) e América (EUA). Ressalta-se que muitas das áreas estudadas apresentam problemas de escassez de água. Com exceção da dissertação de Brinquis (2007), todas as outras pesquisas adotaram a bacia hidrográfica como critério para delimitação da área de estudo, segundo uma visão holística e sistêmica.

Observa-se uma grande variabilidade em relação à extensão das áreas de estudo, com a utilização de micro-bacias (menos de 1km² - LEE, *et al.*, 2010), áreas médias (de 30 a 110 km² - MITCHEL, MAIN e MCMAHON, 2001; SITUMORANG, 2008), até áreas mais extensas (mais de 400km² - KARKA *et al.*, 2007; CHENEVEY e BUCHBERGER, 2013; LEKKAS *et al.*, 2008).

Em geral, as séries de dados climáticos utilizadas são posteriores aos anos 70, variando entre a escala temporal de 6 a 40 anos. A quantidade de *clusters* vetorizados para cada pesquisa também é bastante variável (de 3 a 12 *clusters*). Mitchell, Main e McMahon (2001), por exemplo, utilizam-se de 12 *clusters* em uma área relativamente pequena (30km²), enquanto que Karka *et al.*, (2007) e Lekkas *et al.*, (2008) adotam apenas 5 para áreas mais extensas (mais de 400km²). Mesmo com esta grande variabilidade na escala de trabalho adotada, o modelo gerou bons resultados em todos os casos.

Dentre os principais objetivos identificados nas pesquisas estão: modelar e quantificar balanço hídrico urbano; quantificar os impactos do uso da terra no balanço hídrico; simular cenários pré-urbanos; simular cenários de uso de águas pluviais e reuso de águas residuais - especialmente nos casos onde as cidades enfrentam problemas relacionados à escassez de água.

Em relação aos resultados, eles se mostraram semelhantes em muitos aspectos: todos eles julgaram eficiente a modelagem do *Aquacycle*; impactos da urbanização são uniformes, no sentido de que diminuem índice de evapotranspiração e reabastecimento do aquífero freático, e aumentam escoamento superficial, volume de água importada e de águas residuais na

bacia de drenagem; cenários de uso de águas pluviais e reuso de águas residuais apontam para significativa diminuição nos padrão de escoamento superficial, volume de água importada e águas residuais, bem como aumento do indicador evapotranspiração (no caso da alternativa “telhados verdes”, ou aumento de áreas verdes).

De modo a responder à questão colocada por Mitchell, Main e McMahon (2001) – se *Aquacycle* apresentaria bom desempenho na modelagem de diferentes áreas de estudo – Lekkas *et al.* (2008) atestam que o modelo é genérico e pode ser usado em qualquer bacia hidrográfica urbana.

TABELA 1 RESUMO DE TRABALHOS QUE UTILIZARAM O MODELO *AQUACYCLE* – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE DADOS

TÍTULO*	ANO	AUTORES	ÁREA DE ESTUDO	EXTENSÃO DA ÁREA DE ESTUDO	SÉRIE DE DADOS CLIMÁTICOS	POPULAÇÃO RESIDENTE NA ÁREA DE ESTUDO	QUANTIDADE DE CUSTERS VETORIZADOS
MODELAGEM DO CICLO DA ÁGUA URBANO	2001	MITCHEL, V.G; MEIN, R.G; MCMAHON,	BACIA DE WODEN VALLEY CAMBERRA AUSTRÁLIA	30 KM²	1979 – 1995 (16 ANOS)	N.D.**	12
IMPACTOS DO DESIGN URBANO NO USO DA ÁGUA E NO MICROCLIMA	2005	CLEUGH, H. A; ET. AL	BACIA DE WODEN VALLEY CAMBERRA AUSTRÁLIA	N.D.**	1978 – 1995 (17 ANOS)	37.500	3
ESTUDO DE CASO SOBRE MODELAGEM URBANA INTEGRADA UTILIZANDO <i>AQUACYCLE</i>	2007	KARKA, P.; ET AL.	BACIA DA GRANDE ATENAS ATENAS	400 KM²	N.D.**	3.894.573	5
SIMULAÇÃO DO CICLO URBANO DA ÁGUA EM UM BAIRRO DE UMA CIDADE ESPANHOLA E ESTABELECIMENTO DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DE ÁGUAS URBANAS (Dissertação)	2007	BRINQUIS, M.L.P.S.M	BAIRRO ACTUR-REY FERNANDO ZARAGOZA ESPANHA	N.D.**	2001 – 2006 (6 ANOS)	51.199	7
MODELAGEM INTEGRADA DE ÁGUAS URBANAS UTILIZANDO O <i>AQUACYCLE</i>	2008	LEKKAS, D.F. ; ET. AL	BACIA DA GRANDE ATENAS ATENAS	400 KM²	N.D.**	3.894.573	5
MODELAGEM DO CICLO URBANO DA ÁGUA: ENFOQUE NAS ATERNATIVAS PARA FUTURO ABASTECIMENTO DE ÁGUA. ESTUDO DE CASO EM ACCRA, GANA (Dissertação)	2008	SITUMORANG, M.R.	BACIA DE KPESHIE ACCRA GANA	110 KM²	1970-2005 (35 ANOS)	387.013	4
EFEITOS DAS MUDANÇAS NO USO DO SOLO E DAS OPÇÕES DE REUTILIZAÇÃO DE ÁGUAS NO CICLO URBANO DA ÁGUA	2010	LEE, J.; ET.AL	BACIA DO RIO GOONJA SUEL CORÉIA	0,96 KM²	1975 – 2005 (30 ANOS)	21.230	N.D.**
IMPACTOS DO DESENVOLVIMENTO URBANO NO BALANÇO HÍDRICO LOCAL	2013	CHENEVEY, B.; BUCHBERGER, S.	BACIA DE MILL CREEK CINCINATI EUA	437 KM²	1970 - 2010 (40 ANOS)	500.000	N.D.**

* INFORMAÇÃO NÃO DISPONIBILIZADA PELO AUTOR NO TEXTO DE REFERÊNCIA.

TABELA 2 RESUMO DE TRABALHOS QUE UTILIZARAM O MODELO *AQUACYCLE* – OBJETIVOS E PRINCIPAIS RESULTADOS

TÍTULO*	OBJETIVOS DO TRABALHO	PRINCIPAIS RESULTADOS
MODELAGEM DO CICLO DA ÁGUA URBANO	1) tendo em vista que este artigo foi escrito pelo criador do modelo <i>Aquacycle</i> , teve por objetivo a execução do teste do modelo, utilizando dados da bacia hidrográfica de Woden Valley (camberra-austrália). 2) apontar de que maneiras o modelo pode ser utilizado, bem como quais são suas limitações e possíveis melhorias.	<i>Aquacycle</i> foi capaz de simular o balanço hídrico da bacia de Woden Valley de modo satisfatório. No entanto, necessita de outros testes em bacias com diferentes características climáticas, topográficas, de uso da água e do solo.
IMPACTOS DO DESIGN URBANO NO USO DA ÁGUA E NO MICROCLIMA	1) quantificar os impactos do uso do solo sobre o balanço hídrico na bacia hidrográfica de Woden Valley, utilizando-se da modelagem de um cenário atual e outro pré-urbano. 2) verificar a variação do índice de evapotranspiração em três diferentes designs urbanos.	O estudo constatou que a média anual evapotranspiração urbana é quase o dobro do volume de escoamento superficial na bacia woden valley. Tais índices variam de acordo com design urbano, mostrando-se maiores em áreas que possuem maior concentração de áreas verdes. Concluiu-se também que o modelo <i>Aquacycle</i> é eficiente na simulação de cenários referentes ao comportamento da evapotranspiração urbana.
ESTUDO DE CASO SOBRE MODELAGEM URBANA INTEGRADA UTILIZANDO <i>AQUACYCLE</i>	1) apresentar os resultados preliminares da utilização de <i>Aquacycle</i> na bacia hidrográfica de Atenas. 2) avaliar quais impactos ocorreriam sobre a quantidade de água importada, escoamento superficial e descarga de águas residuais se medidas de reutilização de água fossem adotadas na escala "bloco". Opção 1: tanque de 2m³ de águas pluviais; opção 2: tanque de 5m³ de águas residuais; opção 3: utilização de águas cinzas para irrigação.	Os resultados mostram que as medidas de reutilização contribuiriam para um sistema de águas urbanas mais sustentável. Opção 1: redução de água importada (9%), escoamento superficial (27%) e descarga de águas residuais (1%); opção 2: redução de água importada (41%), escoamento superficial (10%) e descarga de águas residuais (54%); opção 3: redução de água importada (17%), escoamento superficial (4%) e descarga de águas residuais (23%).
SIMULAÇÃO DO CICLO URBANO DA ÁGUA EM UM BAIRRO DE UMA CIDADE ESPANHOLA E ESTABELECIMENTO DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DE ÁGUAS URBANAS (Dissertação)	1) compreender a dinâmica do balanço hídrico do bairro Actur-Rey (Zaragoza-Espanha) a partir do software <i>Aquacycle</i> . 2) apontar caminhos para formas mais sustentáveis de gestão de águas urbanas, através da simulação de três cenários de reuso de água: opção 01-uso de águas pluviais na escala bloco; opção 2- reuso de águas residuais na escala bloco; opção 3- combinação dos cenários 01 e 02.	<i>Aquacycle</i> foi capaz de reproduzir o balanço hídrico do bairro Actur-Rey (Zaragoza-Espanha) de modo satisfatório. A simulação de cenários gerou os seguintes resultados: opção 01 – diminuição do volume de água importada (3%), de escoamento superficial (9%) e de descarga de águas residuais (0,1%); opção 02 – diminuição do volume de água importada (25%), de escoamento superficial (0,04%) e de descarga de águas residuais (27%); opção 03 – diminuição do volume de água importada (27%), de escoamento superficial (7%) e de descarga de águas residuais (27%);
MODELAGEM INTEGRADA DE ÁGUAS URBANAS UTILIZANDO O <i>AQUACYCLE</i>	1) simular uso da água e produção de águas residuais e pluviais na bacia hidrográfica de Atenas. 2) simular três cenários de reutilização de água, a fim de estimar impactos dos mesmos no balanço hídrico urbano.	Os cenários de reutilização de águas podem reduzir o volume de água importada, águas residuais e escoamento superficial. Os autores concluem que o modelo é genérico e pode ser utilizado em qualquer bacia urbana. Apresenta, no entanto, limitações para análise de cenários a longo prazo relacionados a crescimento populacional, expansão urbana e mudanças climáticas.
MODELAGEM DO CICLO URBANO DA ÁGUA: ENFOQUE NAS ALTERNATIVAS PARA FUTURO ABASTECIMENTO DE ÁGUA. ESTUDO DE CASO EM ACCRA, GANA (Dissertação)	1) criar diferentes cenários com uso de águas pluviais e reuso de águas residuais no <i>Aquacycle</i> para a bacia de Kpeshie (Accra, Gana) no modelo <i>Aquacycle</i> , a fim de buscar alternativas para diminuição do volume de água importada para o sistema urbano. 2) estimar o balanço hídrico para cada um dos cenários gerados.	A combinação de cenários com utilização de águas pluviais na escala bloco, associado a reutilização de águas residuais na escala <i>cluster</i> , projetam diminuição de até 52% no volume de água importada para o sistema de águas urbanas.
EFEITOS DAS MUDANÇAS NO USO DO SOLO E DAS OPÇÕES DE REUTILIZAÇÃO DE ÁGUAS NO CICLO URBANO DA ÁGUA	1) avaliar os efeitos do uso da terra no balanço hídrico urbano na bacia hidrográfica do rio Goonja (Suel-Corêia) entre os anos de 1975 e 2005 (a análise dos dados foi feita de 5 em 5 anos). 2) simular cenários com utilização de águas pluviais, reuso de águas residuais e os reflexos que trariam ao balanço hídrico.	Com aumento de áreas impermeabilizadas (43% para 84%) entre os anos de 1975 a 2005, houve diminuição da evapotranspiração (29%), aumento do escoamento superficial (41%) e diminuição no abastecimento do nível freático (74%). Em relação à reutilização de águas, gerou cenários capazes de diminuir o volume de água importada (13%), de águas residuais (30%) e o escoamento superficial (36%). A reutilização de águas residuais apresentou vantagens sobre o uso de águas pluviais.
IMPACTOS DO DESENVOLVIMENTO URBANO NO BALANÇO HÍDRICO LOCAL URBANO NO BALANÇO HÍDRICO LOCAL	1) estimar balanços hídricos urbanos anuais entre os anos de 1970 e 2010 para a bacia hidrográfica de Mill Creek (Cincinnati-EUA). 2) com base nos dados obtidos, objetivou-se estabelecer comparações com as condições de pré-desenvolvimento da bacia hidrográfica, com intervalo de 50 anos, a partir do ano de 1700. 3) simular cenários com utilização de águas pluviais e reuso de águas residuais.	Comparações entre as condições atuais e de pré-desenvolvimento mostraram que o volume total de água que entra e sai da bacia aumentou (28%) e que a evapotranspiração diminuiu (22%). A simulação do cenário com telhados verdes mostrou possibilidade de redução de vazões (6%), de águas residuais (5%) e aumento da evapotranspiração anual (8%).

3 PERCURSO METODOLÓGICO

O organograma da Figura 7 mostra a estrutura metodológica adotada, relacionando cada objetivo específico com seus respectivos subcapítulos da metodologia, os quais se relacionam para resolução do objetivo geral (avaliação dos efeitos da configuração urbana no balanço hídrico com aplicação do modelo *Aquacycle* na bacia hidrográfica do rio Belém – Curitiba/PR).

Sendo assim, a descrição da área de estudo (item 3.1) dá base para o desenvolvimento da pesquisa em todas as suas ramificações; o item 3.2 (critérios para delimitação das unidades de resposta hidrológica) define a metodologia adotada para resolução do objetivo específico 1; o item 3.3 faz uma breve descrição de como foram obtidos os componentes da dinâmica hídrica das unidades de resposta hidrológica delimitadas, relacionando-se com o objetivo específico 2; e os itens 3.4, 3.5 e 3.6 estruturam-se de modo a equacionar as questões observadas nos objetivos específicos 3 (simulação de balanço hídrico na área de estudo selecionada a partir do modelo *Aquacycle*) e 4 (comparação entre o balanço hídrico de cada unidade de resposta hidrológica, com base no percentual de impermeabilização do solo de cada uma delas).

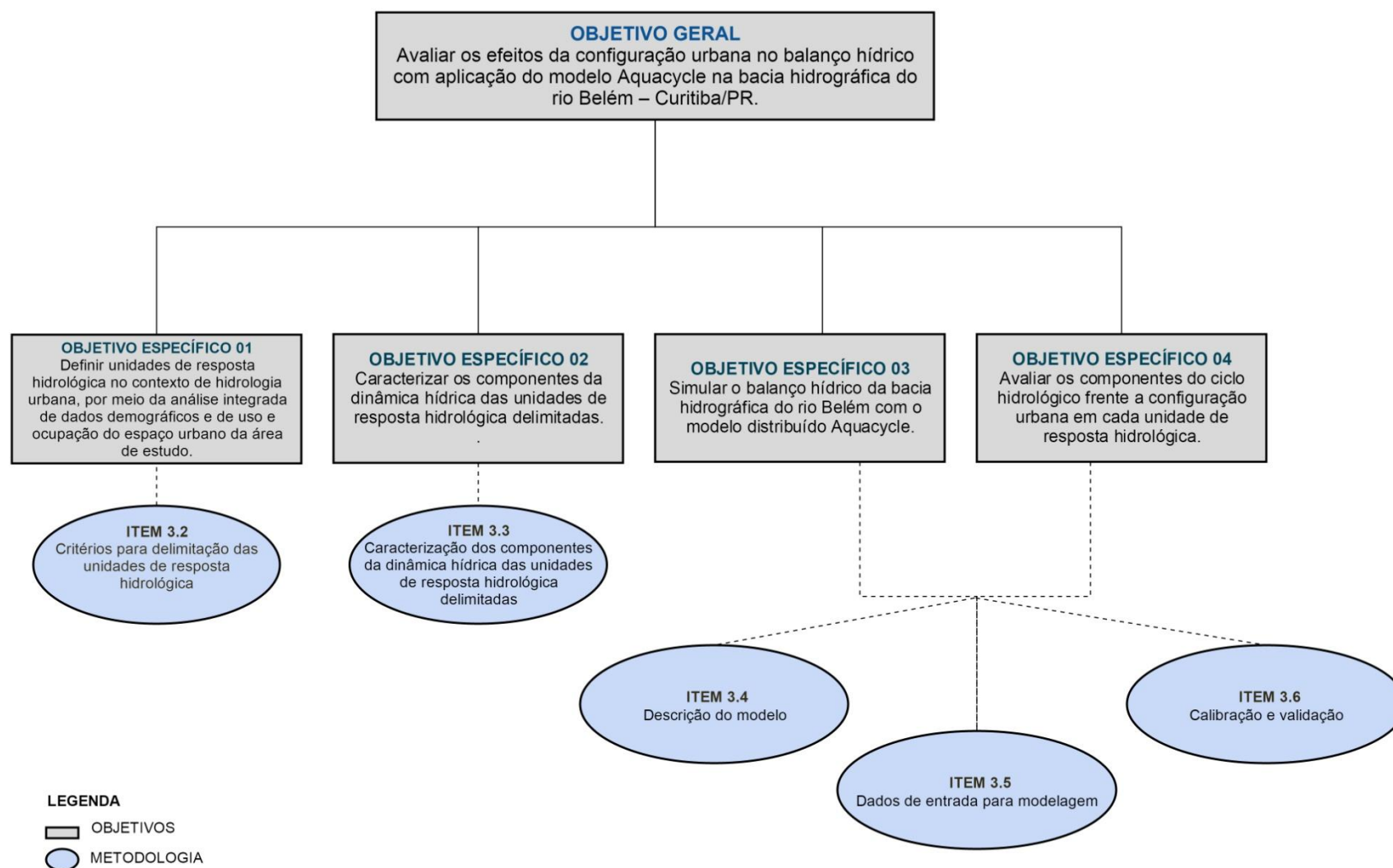


FIGURA 7 ORGANOGrama METODOLÓGICO

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Responsável pela drenagem de 20% do território de Curitiba, a bacia do rio Belém possui 87,59 km² e abrange um total de 45 bairros do município, conforme ilustra o mapa da Figura 8. Destaca-se que o rio Belém é um rio genuinamente curitibano. Ele nasce no bairro Cachoeira, onde em 24 de novembro de 2001 foi inaugurado o Parque Municipal Nascentes do Belém (CURITIBA, 2016), e deságua no rio Iguaçu entre os bairros Boqueirão e Uberaba.

Na presente pesquisa, a área total da bacia foi definida até uma seção transversal de controle - Estação Fluviométrica Prado Velho - resultando em uma área de drenagem a montante de 42,6km² e abrangência de 35 bairros. Essa área foi selecionada, pois a estação Prado Velho é a única na bacia e os dados hidrológicos foram utilizados para modelagem e calibração do Aquacycle. No presente trabalho, a área de estudo será denominada de bacia hidrográfica do rio Belém.

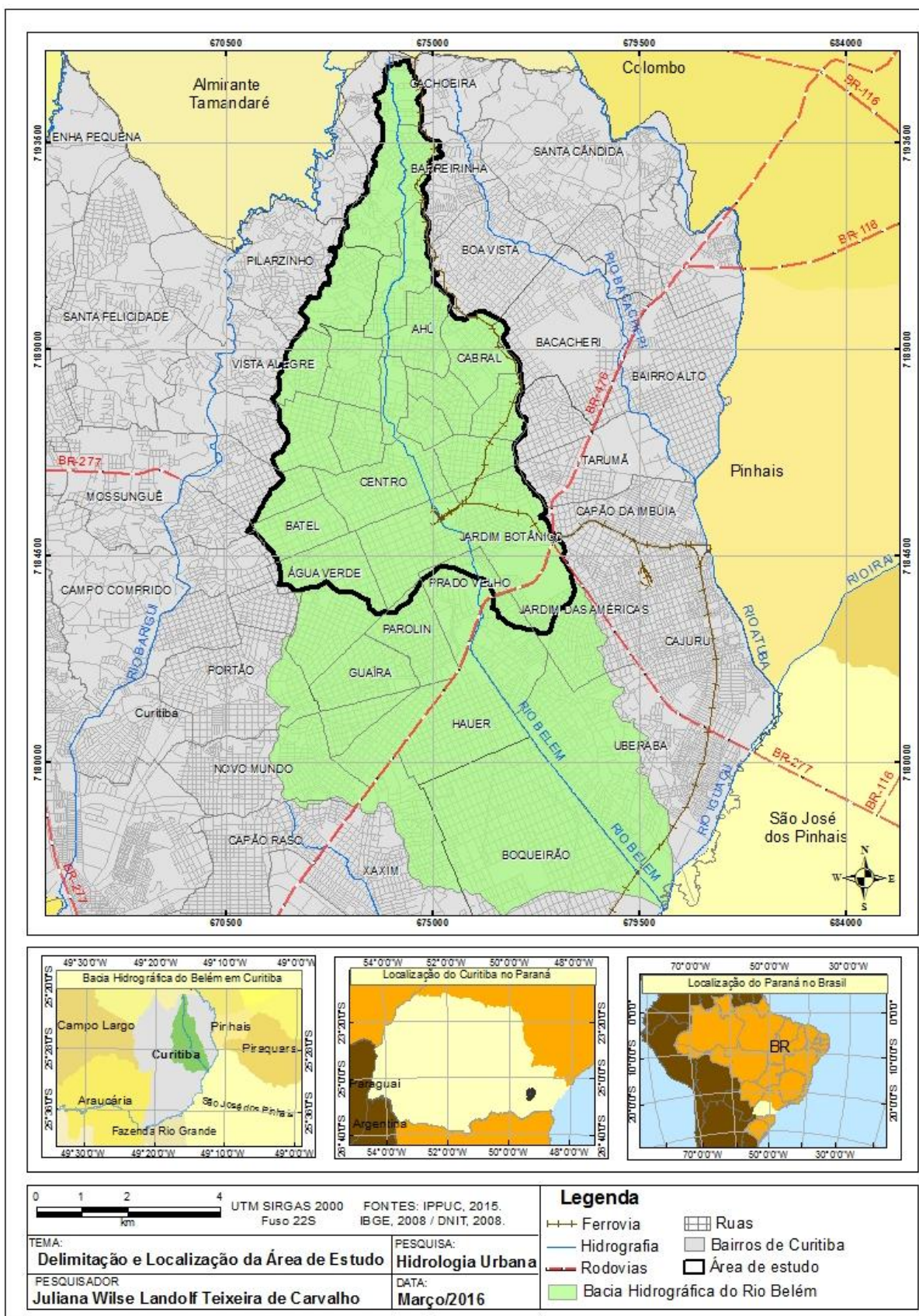


FIGURA 8 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo selecionada abriga toda a área central da cidade, centro histórico, importantes instituições como UFPR (campi Santos Andrade, Reitoria, Botânico e Politécnico), PUC-PR (campi Prado Velho), UNILIVRE, os prédios de administração pública municipal e estadual na região do Centro Cívico, bem como parques e espaços de lazer de referência para a capital, como o Parque São Lourenço, Bosque do Papa, Bosque do Alemão, Passeio Público, Jardim Botânico, Ópera de Arame, Museu Oscar Niemeyer e Pedreira Paulo Lemisnki, cuja espacialização pode ser observada no mapa da Figura 9.

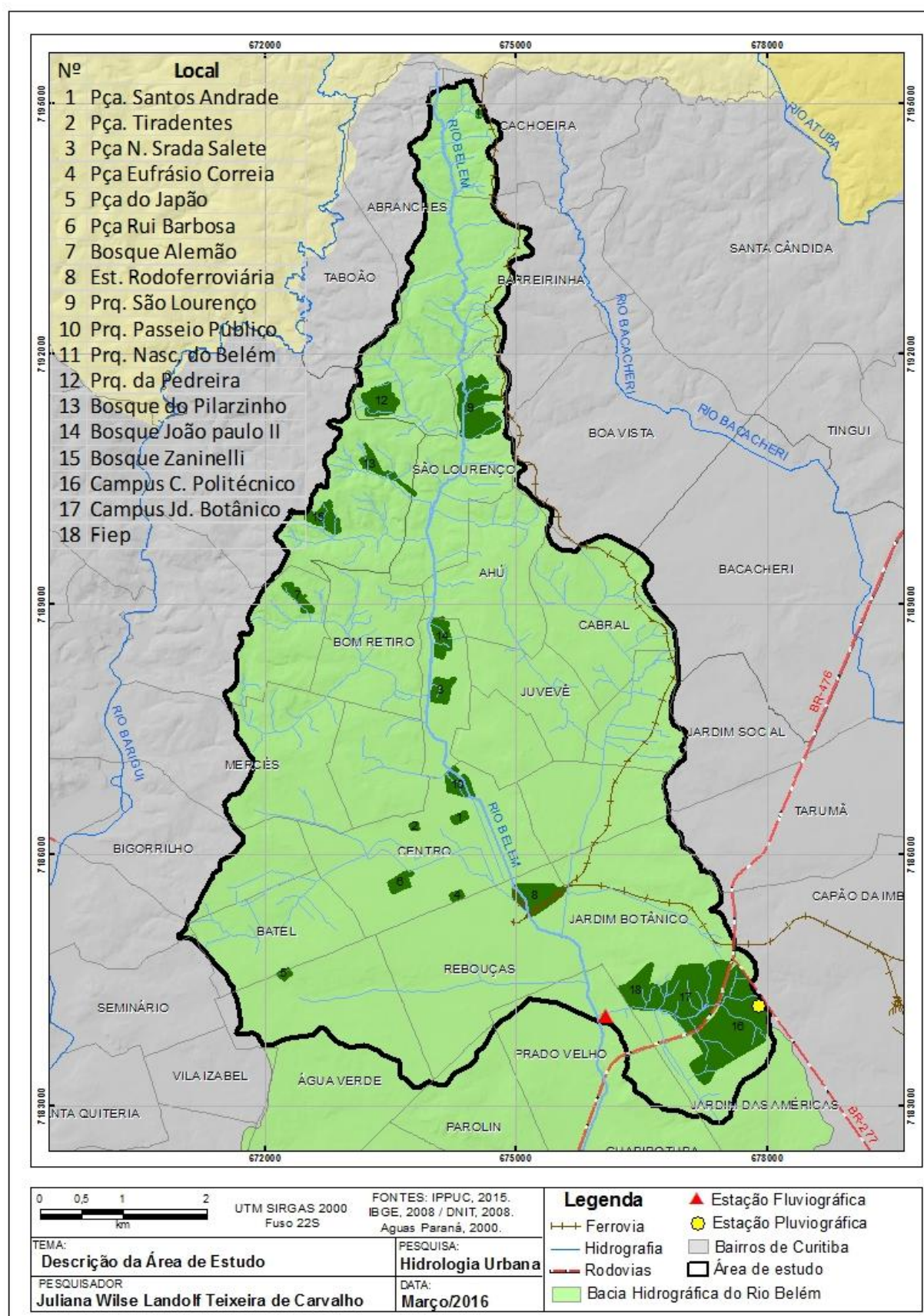


FIGURA 9 PRINCIPAIS PONTOS DE REFERÊNCIA DA ÁREA DE ESTUDO

No contexto geológico, a bacia do rio Belém localiza-se integralmente no primeiro planalto paranaense. Ao norte da bacia predominam formações do Complexo Granítico-Gnáissico e no médio e baixo curso, a formação Guabirotuba. Ambas são recobertas por sedimentos de origem flúvio-lacustre de idade holocênica-pleistocênica (MINEROPAR, 2006). A altitude da área de estudo varia entre 880 e 980m, conforme ilustra o mapa hipsométrico (FIGURA 10).

A associação de características pedológicas – solos naturalmente de baixa permeabilidade, provenientes da formação Guabirotuba e dos depósitos sedimentares recentes - à densa urbanização da bacia e impermeabilização artificial do solo, propicia o aumento do escoamento superficial e dos picos de vazão máxima do canal principal, colaborando para a ocorrência de enchentes ao longo da bacia (FENDRICH, 2002).

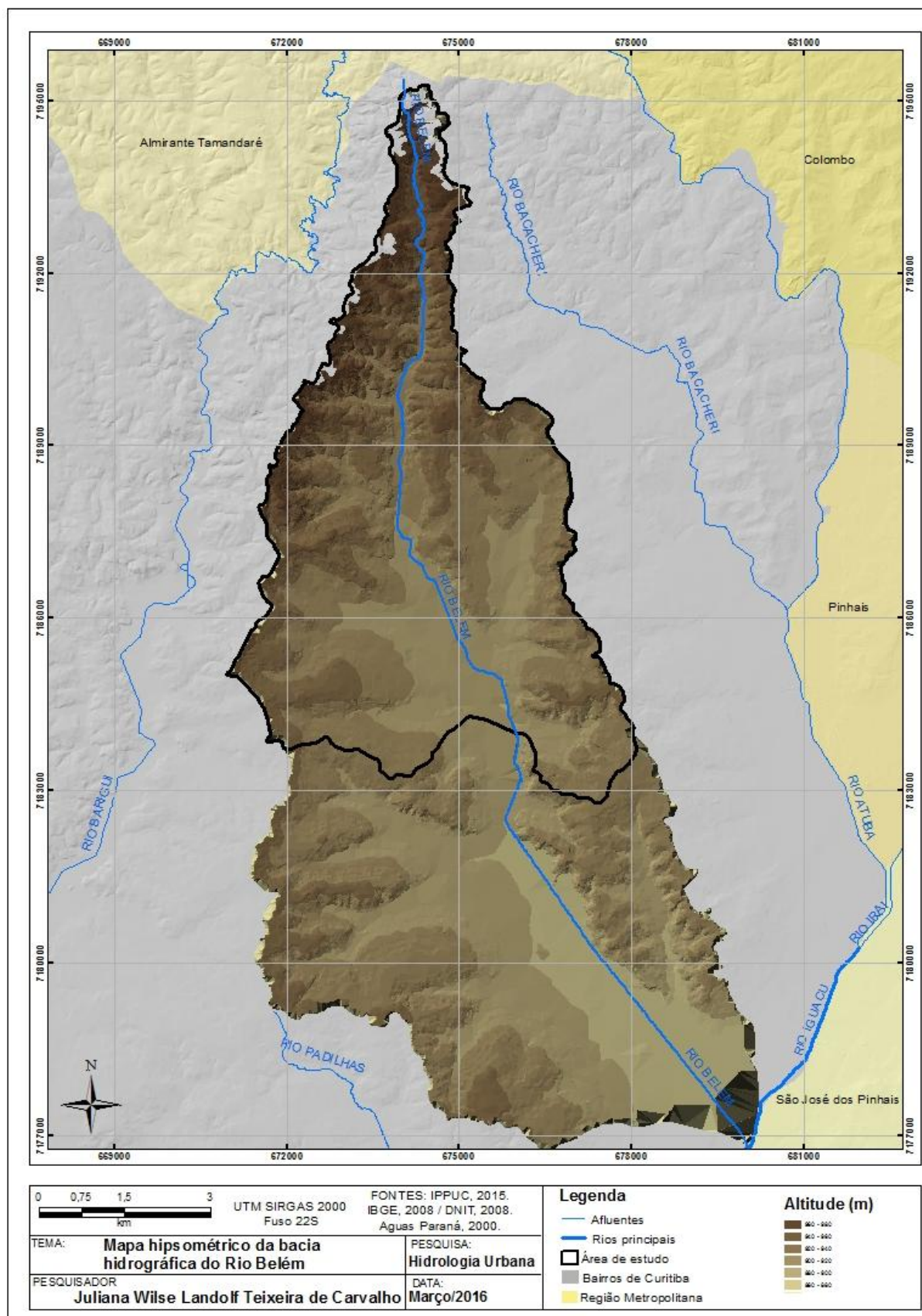


FIGURA 10 HIPSOMETRIA

A bacia hidrográfica do rio Belém possui histórico de inundações e contaminação por esgoto doméstico e industrial de longa data. Existem registros de enchentes na região do centro de Curitiba desde o final do século XIX, período em que a cidade começava a se consolidar. Desde o final do século XIX até o início do século XX, as águas do Belém eram utilizadas para abastecimento da população curitibana. Ao mesmo tempo, servia de canal para despejo do esgoto produzido nas residências. A contaminação do rio, associada à ocorrência de enchentes provocou, no ano de 1917, um surto epidêmico de febre tifóide (CASA DA MEMÓRIA DE CURITIBA, 1978-a).

Os mananciais de abastecimento de água da cidade de Curitiba mudaram para fontes mais distanciadas e consideradas mais seguras. Os problemas referentes à poluição e às enchentes do rio Belém, no entanto, continuaram, e se agravaram com o crescimento e consolidação da cidade. No início do século, as enchentes eram bastante frequentes na área central da cidade.

As obras de saneamento no rio Belém tiveram início entre os anos 1930 e 1935, durante as gestões de Joaquim Pereira de Macedo e Jorge Lothário Meissner, quando passou pelas primeiras obras de retificação, onde grande parte de seu percurso sinuoso e meandrante foi retilinizado. No relatório das obras consta que o rio passaria de 17,8km de extensão para apenas 7,2km, aumentando o declive de seu leito e o escoamento das águas. Na década de 40, o canal Belém começara a ganhar um fundo cimentado (CASA DA MEMÓRIA DE CURITIBA, 1978b). Tais obras foram efetuadas com o objetivo de diminuir as enchentes frequentes na região central.

Foi no ano de 1975 que teve início a maior obra de canalização do rio Belém, resolvendo grande parte dos problemas relacionados à enchentes e ao mau cheiro do rio na região central da cidade. A Prefeitura Municipal de Curitiba, em parceria com o DNOS (Departamento Nacional de Obras de Saneamento), por meio da empresa de engenharia ESUSA, realizaram canalização de cerca de 2160 metros do rio, desde a Estação Rodoferroviária até a Avenida Cândido de Abreu. No dia 20 de maio de 1978 o novo canal estava concluído (CASA DA MEMÓRIA DE CURITIBA, 1978-b). Tais obras foram capazes de resolver (a curto prazo) de modo relativamente eficaz os problemas das enchentes no centro da cidade, no entanto, transferiram

problemas para jusante, desde a região do Prado Velho até sua foz, no bairro Boqueirão, junto ao rio Iguaçu. Ainda hoje são frequentes os registros de enchentes em tais regiões e também no centro da cidade. Exemplo recente foi a inundação de 22 de fevereiro deste ano, que deixou ruas alagadas e o trânsito caótico na região central (RIBEIRO, 2016).

Muitos projetos de revitalização do rio Belém foram elaborados ao longo do tempo, sem a obtenção, no entanto, de sucesso. Manchetes de “Diário do Paraná” (CASA DA MEMÓRIA DE CURITIBA, 1980a) e “Estado do Paraná” (CASA DA MEMÓRIA DE CURITIBA, 1980b) anunciavam, à exemplo, projeto da Prefeitura de Curitiba de revitalização do rio Belém, com a promessa de que o rio voltaria a ter lambaris. Projetos como este ficaram, no entanto, apenas no papel. O que seguiram foram apenas obras de retificação e canalização de seus afluentes, o contínuo e crescente despejo de esgoto em seu curso e uma série de dragagens para diminuição dos efeitos das enchentes.

Quanto à identificação do perfil socioeconômico dos residentes da área de estudo, constata-se que as populações mais carentes (com menor renda domiciliar per capita), encontram-se no extremo norte da bacia (bairros Abranches, Cachoeira e Barreirinha), nas vilas Parolin e Torres (médio curso do rio) e na nas margens do baixo curso do rio Belém (bairros Hauer, Uberaba e Boqueirão), justamente onde encontram-se as áreas mais suscetíveis ao risco de enchentes, conforme ilustra o mapa da Figura 11.

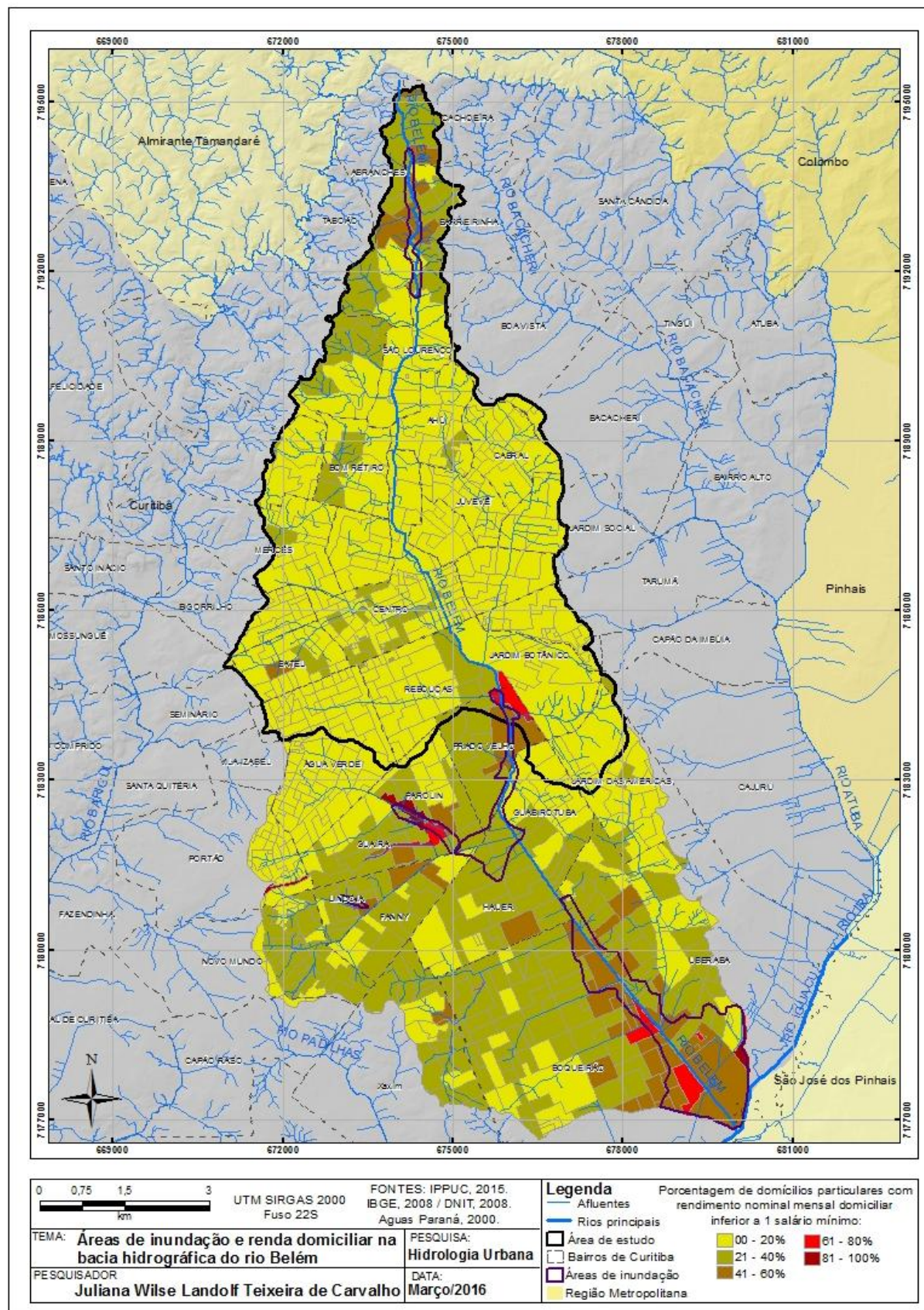


FIGURA 11 ÁREAS INUNDAVEIS E RENDA NOMINAL PER CAPITA

3.2 CRITÉRIOS PARA DELIMITAÇÃO DE UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA

Para delimitação das unidades de resposta hidrológica, também denominadas neste trabalho como *clusters*, buscou-se identificar áreas que apresentassem características cognatas, especialmente em relação à densidade demográfica e ao uso e ocupação do solo, a fim de definir áreas que pudessem apresentar similaridade hidrológica quando inseridas no modelo *Aquacycle*. Para isso, foram utilizados dados demográficos (IBGE, 2010), fotointerpretação de imagens orbitais atuais obtidas por meio da versão temporária do Google Earth PRO, base cartográfica *zoneamento* de Curitiba (IPPUC, 2007) e lei do Zoneamento e Uso do Solo (IPPUC, 2015).

Inicialmente, foram selecionados os setores censitários (IBGE, 2010) que pertencem à bacia hidrográfica do alto e médio curso do rio Belém. Como sua delimitação não condiz com os critérios de demarcação da área de estudo (divisores de água da bacia hidrográfica), os setores foram recortados e adaptados à área em ambiente SIG, conforme Figura 12. Os dados demográficos dos setores fragmentados foram recalculados de acordo com a área de estudo selecionada, resultando no mapa temático de densidade demográfica (FIGURA 12 (d)), evidenciando uma maior concentração populacional nas áreas central e sudoeste da bacia.

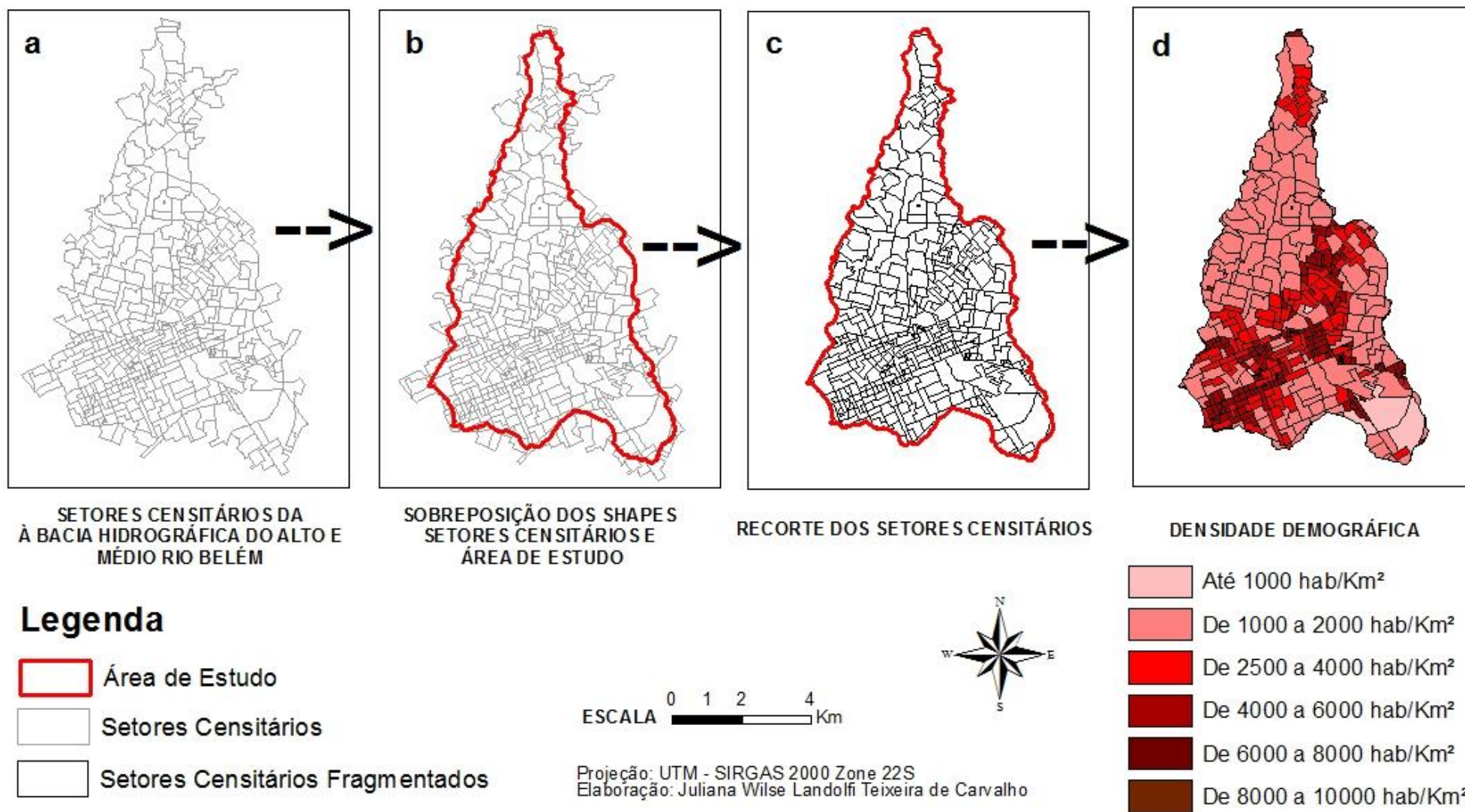


FIGURA 12 SELEÇÃO DE SETORES CENSITÁRIOS PARA A ÁREA DE ESTUDO (1,2 E 3) E MAPA TEMÁTICO DE DENSIDADE DEMOGRÁFICA POR SETOR CENSITÁRIO (4)

Em seguida, foram utilizados o mapa digital de *zoneamento* (IPPUC, 2007) e a lei do Zoneamento e Uso do Solo (IPPUC, 2015) para identificação das características e espacialização das zonas presentes na área de estudo. A lei de zoneamento define critérios importantes para construções, que podem influenciar na dinâmica hídrica da bacia, tanto em relação ao volume de água importada e residual, quanto na dinâmica de infiltração da água no solo, escoamento superficial, evapotranspiração, dentre outros. Dentre tais critérios destacam-se: taxa de ocupação da edificação no lote, número de pavimentos e área permeável mínima. Muitas destas regras culminam em um dos principais objetivos do zoneamento: preservação dos valores naturais da cidade e incentivo à preservação ambiental (IPPUC, 2015).

Na área de estudo, foram identificadas 15 zonas, listadas – juntamente com seus principais critérios para construção – na Tabela 3. Em função da proximidade espacial e/ou semelhanças identificadas na lei, a fim de aproximar os critérios de delimitação de *clusters*, foi feito um primeiro agrupamento de zonas. Assim, SECF, SE BR116, SEMF foram integradas à SE e ZRM, ZRB e ZEAG foram agrupados e renomeados como ZRV - Zona Residencial (vários).

TABELA 3 PRINCIPAIS CRITÉRIOS PARA CONSTRUÇÃO NAS ZONAS IDENTIFICADAS NA ÁREA DE ESTUDO

ZONA	SIGLA	TAXA DE OCUPAÇÃO (%)	PAVIMENTOS	ÁREA PERMEÁVEL (%)
Setor Especial Estrutural	SE	100 (térreo e 1º pav.)	LIVRE	§ 5º DO ART. 42*
Setor Especial Av. Comendador Franco	SECF	50- (demais pav.) 50	4	25
Setor Especial Av. Marechal Floriano Peixoto	SEMF	50	4	25
Setor Especial BR116	SE BR116	50	6 (de frente para a BR) LIVRE (nos polos)	25
Setor Especial Centro Cívico	SECC	50	LIVRE (terrenos com frente para a Av. Cândido de Abreu) 6 (demais vias)	25

continua

TABELA 3 PRINCIPAIS CRITÉRIOS PARA CONSTRUÇÃO NAS ZONAS IDENTIFICADAS NA ÁREA DE ESTUDO

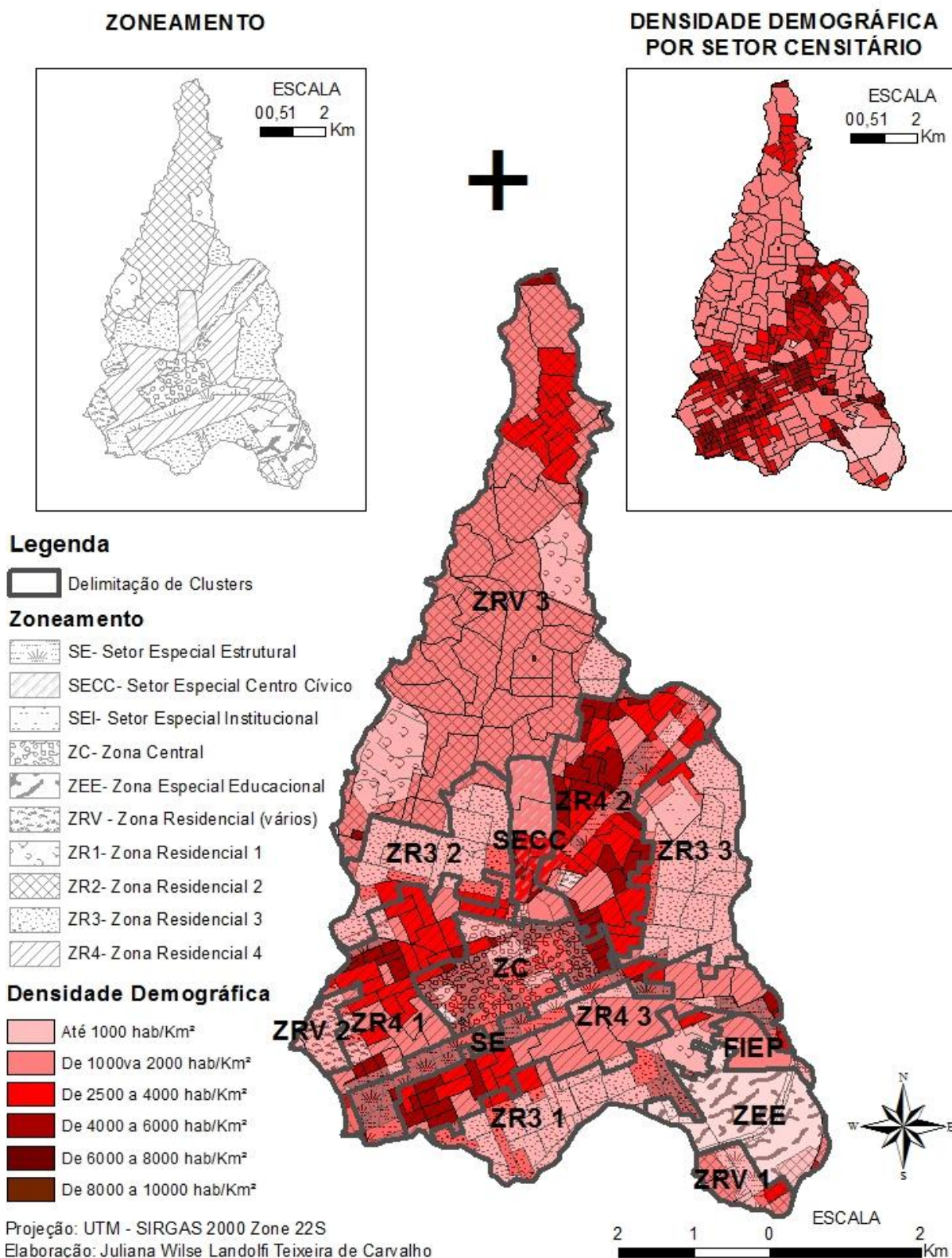
continuação				
ZONA	SIGLA	TAXA DE OCUPAÇÃO (%)	PAVIMENTOS	ÁREA PERMEÁVEL (%)
Setor Especial Institucional	SEI	50 (habitações unifamiliares) 30 (demais casos)	3 (habitações unifamiliares) 4 (demais casos)	25
Zona Central	ZC	100 (térreo e 1º pav.) 66 (demais pav.)	LIVRE	§ 5º DO ART. 42 ⁶
Zona Especial Educacional	ZEE	30	4 (mais de 4 pavimentos podem ser autorizados mediante apresentação de plano de ocupação para a área)	25
Zona Residencial 01	ZR 1	50	2	25
Zona Residencial 02	ZR 2	50	2	25
Zona Residencial 03	ZR 3	50	2 (comércio e serviço vicinal) 3 (demais casos)	N.D.*
Zona Residencial 04	ZR 4	50	6 (residências) 2 (comércio e serviço vicinal e de bairro)	25
Zona Residencial Batel	ZRB	50	2	25
Zona Residencial Alto Da Glória	ZRAG	50	2	25
Zona Residencial Mercês	ZRM	50	2	25

FONTE: IPPUC (2015)

* INFORMAÇÃO NÃO DISPONIBILIZADA EM IPPUC (2015)

Foi então realizada as sobreposição dos dados referentes à densidade demográfica e ao zoneamento (ilustrados na FIGURA 13) que, juntamente com a utilização de fotointerpretação de imagens orbitais atuais, auxiliaram na identificação visual da configuração espacial da área de estudo. Com a utilização integrada de tais instrumentos, foram delimitados 14 *clusters*.

⁶ § 5º DO ART. 42: “De acordo com o tipo de atividade e a zona ou setor onde se localiza, a taxa de permeabilidade poderá ser reduzida, substituída ou complementada através da implantação de mecanismos de contenção de cheias, os quais serão objeto de regulamentação específica.” (CURITIBA, 2000)



A nomenclatura dos *clusters* teve como base a nomenclatura das zonas anteriormente apresentadas. No entanto, novos rearranjos e um segundo agrupamento de zonas foi realizado:

- áreas de ZR 1 e ZR 2 foram incorporadas à ZRV e ZR 3, de acordo com as características da vizinhança e com a densidade demográfica;
- SE foi incorporado a setores maiores, com exceção do SE localizado na Avenida Sete de Setembro, pois possui características muito distintas das áreas vizinhas;
- SEI, devido à suas dimensões espaciais e equivalência na densidade demográfica foi incorporado à ZR3 3.

Ao final, a denominação dos *clusters* se deu, portanto, da seguinte maneira (TABELA 4):

TABELA 4 DENOMINAÇÃO DOS *CLUSTERS* DA ÁREA DE ESTUDO

Nº DO CLUSTER	NOME DO CLUSTER	ABREVIÇÃO
1	Jardim Botânico	JB
2	Setor Especial	SE
3	Setor Especial Centro Cívico	SECC
4	Zona Central	ZC
5	Zona Especial Educacional	ZEE
6	Zona Residencial 3-1	ZR3 1
7	Zona Residencial 3-2	ZR3 2
8	Zona Residencial 3-3	ZR3 3
9	Zona Residencial 4-1	ZR4 1
10	Zona Residencial 4-2	ZR4 2
11	Zona Residencial 4-3	ZR4 3
12	Zona Residencial (vários) 1	ZRV 1
13	Zona Residencial (vários) 2	ZRV 2
14	Zona Residencial (vários) 3	ZRV 3

3.3 CRITÉRIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA DINÂMICA HÍDRICA DAS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA DELIMITADAS

A caracterização dos componentes da dinâmica hídrica de cada unidade de resposta hidrológica se deu através do mapeamento de uso da terra, utilizando-se das categorias aceitas pelo modelo *Aquacycle*: jardim, telhado, rua, espaço público aberto e áreas pavimentadas.

Os dados referentes ao uso da terra foram obtidos por meio do mapeamento da área de estudo, o qual foi realizado em ambiente SIG, com

base na fotointerpretação de imagens orbitais atuais em alta resolução, obtidas por meio da versão temporária do Google Earth PRO. A fim de obter escala de detalhe da área de estudo, foi realizado o georreferenciamento de um mosaico de 17 imagens.

Devido à dificuldade de vetorizar todos os elementos da área de estudo, em função da grande quantidade de lotes (36.276), e também dada a uniformidade no padrão de ocupação dentro de cada área de similaridade hidrológica, foram desenhados os polígonos de um determinado número de “quadras base” em cada *cluster*, para posterior cálculo de proporcionalidade. Apenas os *clusters* JB, ZEE e SECC foram inteiramente vetorizados manualmente, dada heterogeneidade da composição de suas quadras. De acordo com a requisição do modelo, foram utilizadas as seguintes categorias de uso da terra: áreas pavimentadas, ruas, telhados, jardins e espaço público aberto.

Com objetivo de se obter o maior nível de precisão possível no mapeamento das categorias de uso da terra requisitadas pelo modelo, a vetorização das áreas escolhidas para base do cálculo estatístico foi feita em detalhe, na maior escala gráfica possível. Sendo assim, dentro dos blocos vetorizados, constam os limites de cada telhado, jardim ou área pavimentada. Dentro dos *clusters*, da mesma forma, foram desenhados em detalhe os limites das ruas, calçadas e canteiros (FIGURA 14).

A Figura 15 ilustra um exemplo de mapeamento de *cluster* (ZR4 1) com 3 “quadras base”. Ressalta-se que as quadras não desenhadas, ou seja, as denominadas “quadras para estatística”, deveriam possuir características de ocupação do solo visualmente homogêneas. As áreas consideradas heterogêneas foram manualmente desenhadas para evitar discrepâncias ao final da estimativa.

Para cada diferente tipo de zona (ex: ZR3, ZR4, ZR Vários) foram selecionadas 10 “quadras base”. A quantidade de “quadras base” em cada *cluster* variou de acordo com sua área total (TABELA 5).

TABELA 5 VETORIZAÇÃO DE "QUADRAS BASE" NOS CLUSTERS

Nº DO CLUSTER	NOME DO CLUSTER	Nº DE QUADRAS BASE
1	JB	VETORIZAÇÃO COMPLETA
2	SE	10
3	SECC	VETORIZAÇÃO COMPLETA
4	ZC	10
5	ZEE	VETORIZAÇÃO COMPLETA
6	ZRV 1	6
7	ZRV 2	4
8	ZRV 3	10
9	ZR3 1	3
10	ZR3 2	3
11	ZR3 3	4
12	ZR4 1	3
13	ZR4 2	4
14	ZR4 3	3

Alguns detalhes são relevantes em relação à vetorização dos *clusters* ZR3 1 e ZRV 3. Quanto à ZR3 1, foi necessário separar as quadras da Vila Torres (FIGURA 16), pois possuem características muito diferentes do restante das quadras do *cluster*. Para o cálculo de uso da terra da Vila Torres foi vetorizada uma “quadra base”. Quanto à ZRV 3, destaca-se a presença de grandes quadras com predominância de áreas verdes. A elas também foi dado tratamento especial, sendo vetorizada uma quadra base, conforme Figura 17. Além disso, foram selecionadas 10 quadras base para o restante do *cluster*, por apresentar características de ocupação do solo visualmente diferentes de ZRV1 e ZRV2.

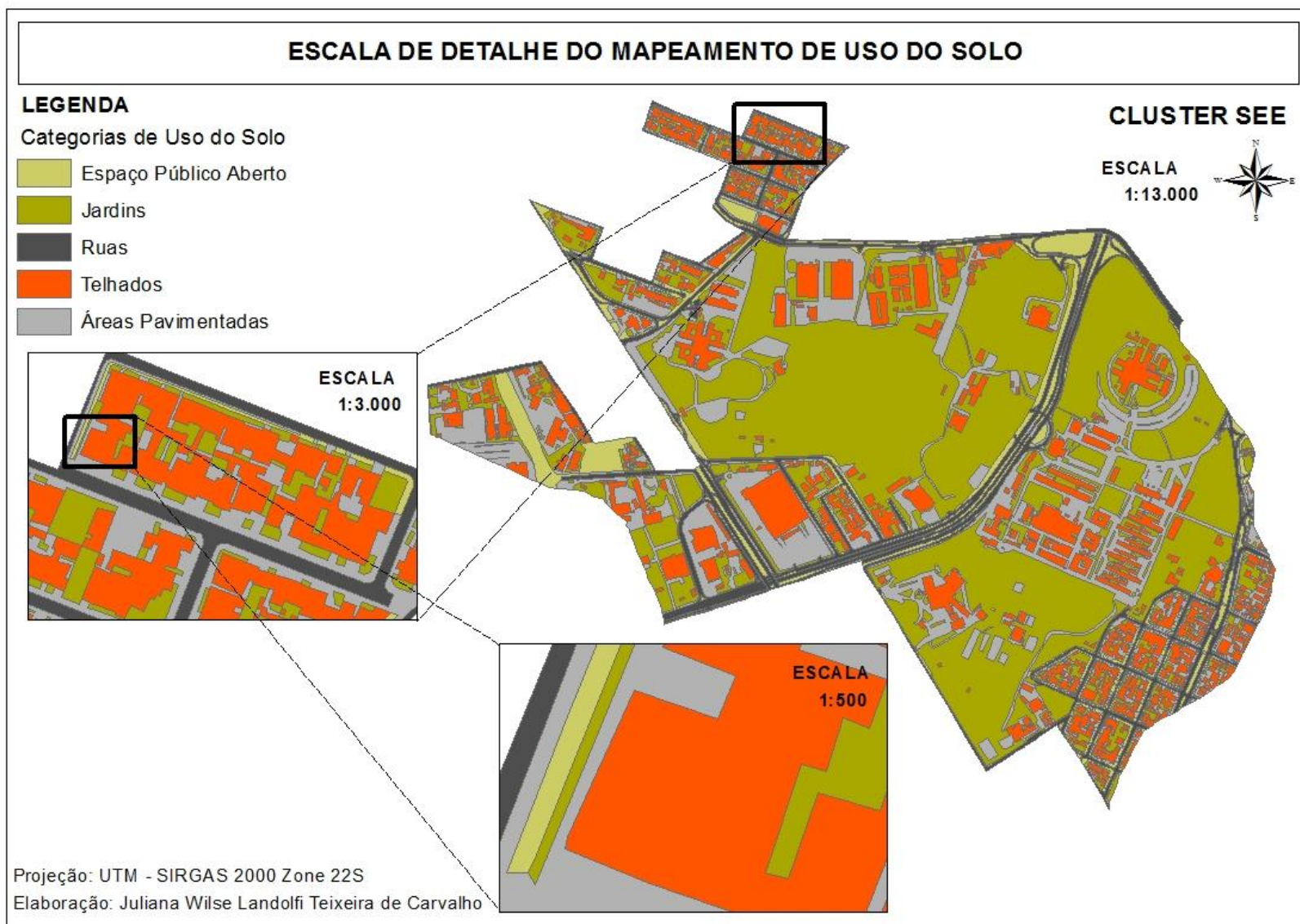


FIGURA 14 ESCALA DE DETALHE PARA MAPEAMENTO DE USO DA TERRA

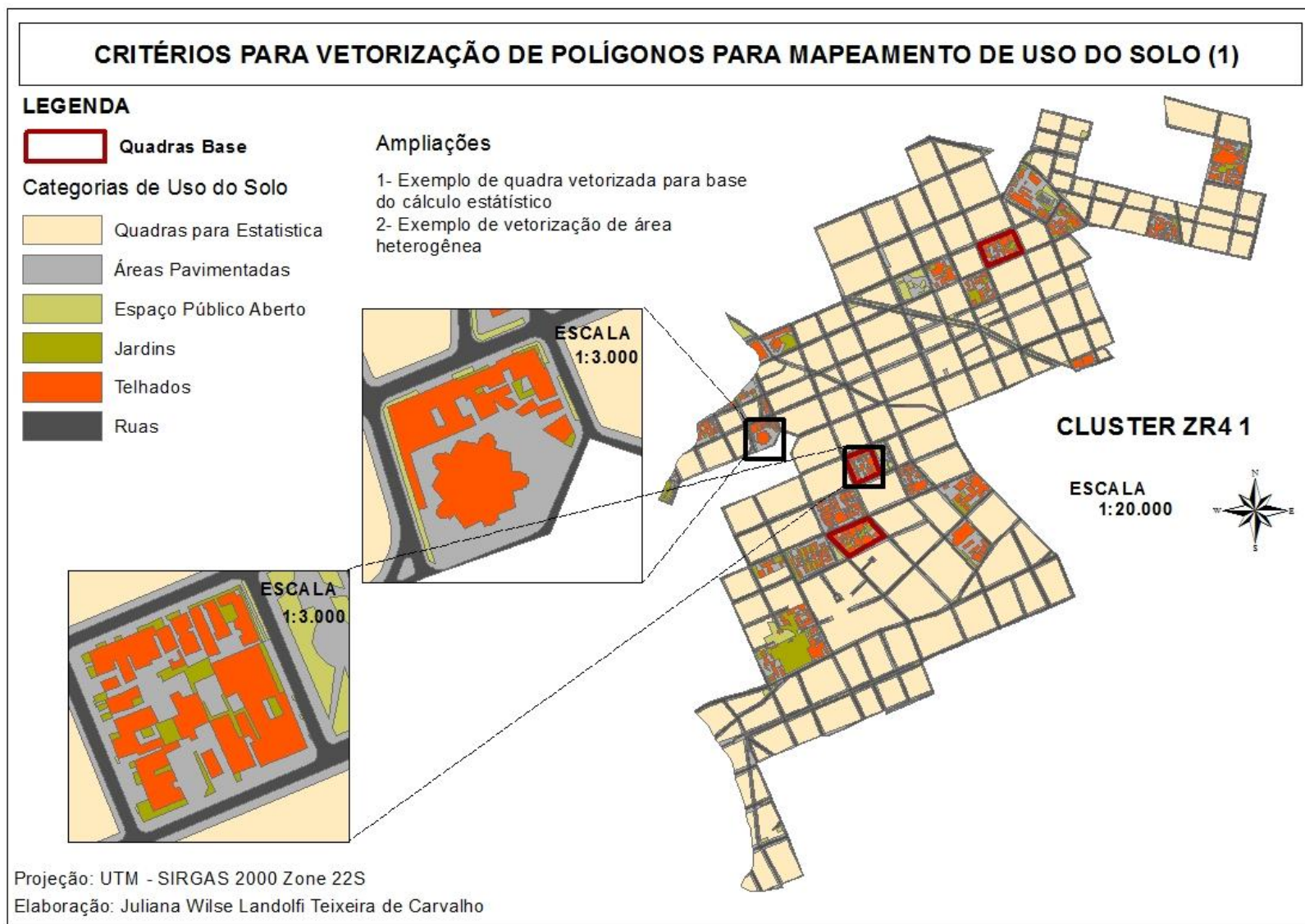


FIGURA 15 CRITÉRIOS PARA VETORIZAÇÃO DE POLÍGONOS PARA MAPEAMENTO DE USO DA TERRA (1)

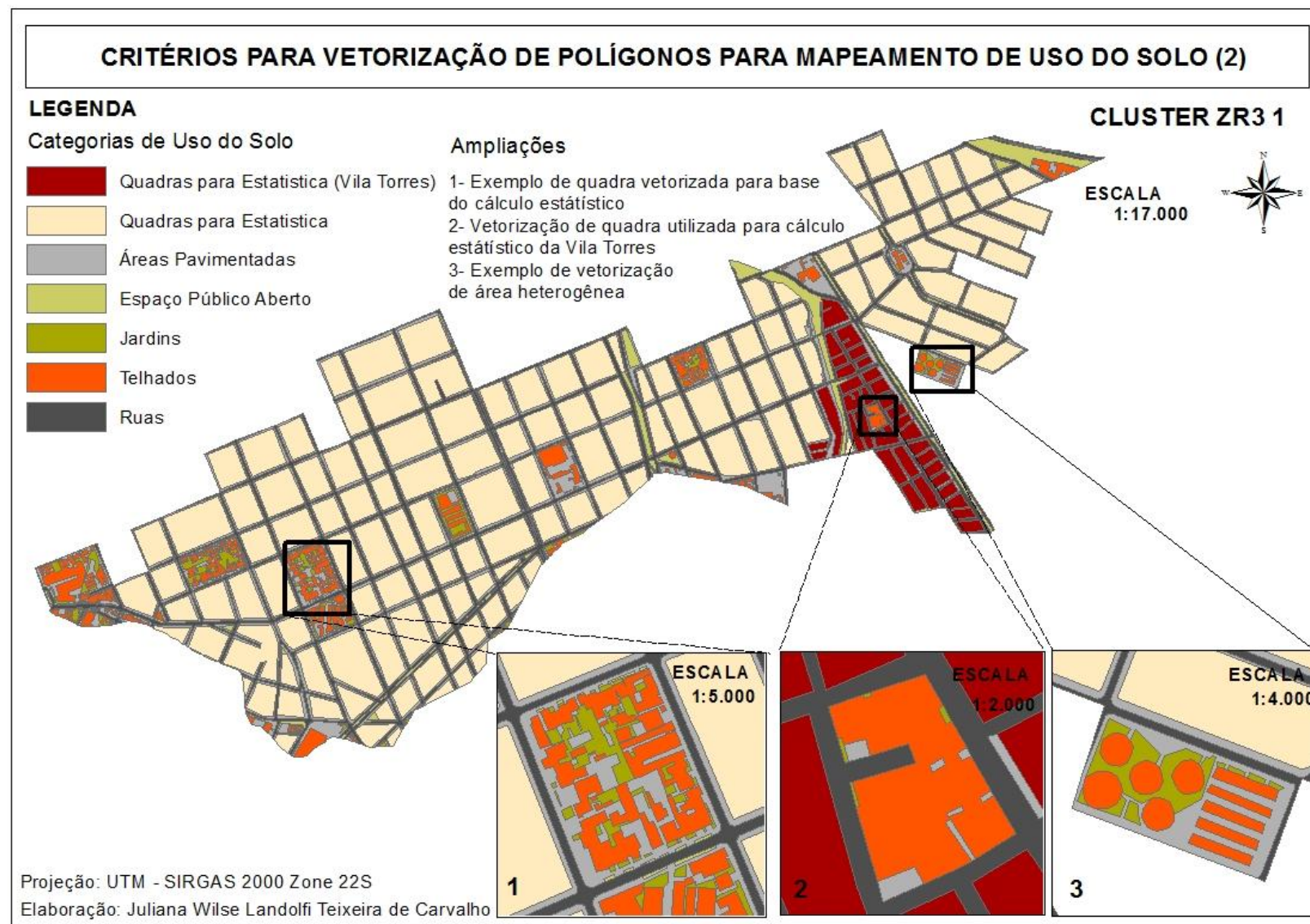


FIGURA 16 CRITÉRIOS PARA VETORIZAÇÃO DE POLÍGONOS PARA MAPEAMENTO DE USO DA TERRA (2)



FIGURA 17 CRITÉRIOS PARA VETORIZAÇÃO DE POLÍGONOS PARA MAPEAMENTO DE USO DA TERRA (3)

Após término do mapeamento e compilação das áreas de telhado, jardins e áreas pavimentadas em cada “quadra base”, foi calculado o desvio padrão⁷ para cada zona, para verificação estatística da real similaridade de ocupação entre as quadras (TABELA 6).

TABELA 6 DESVIO PADRÃO DAS "QUADRAS BASE"

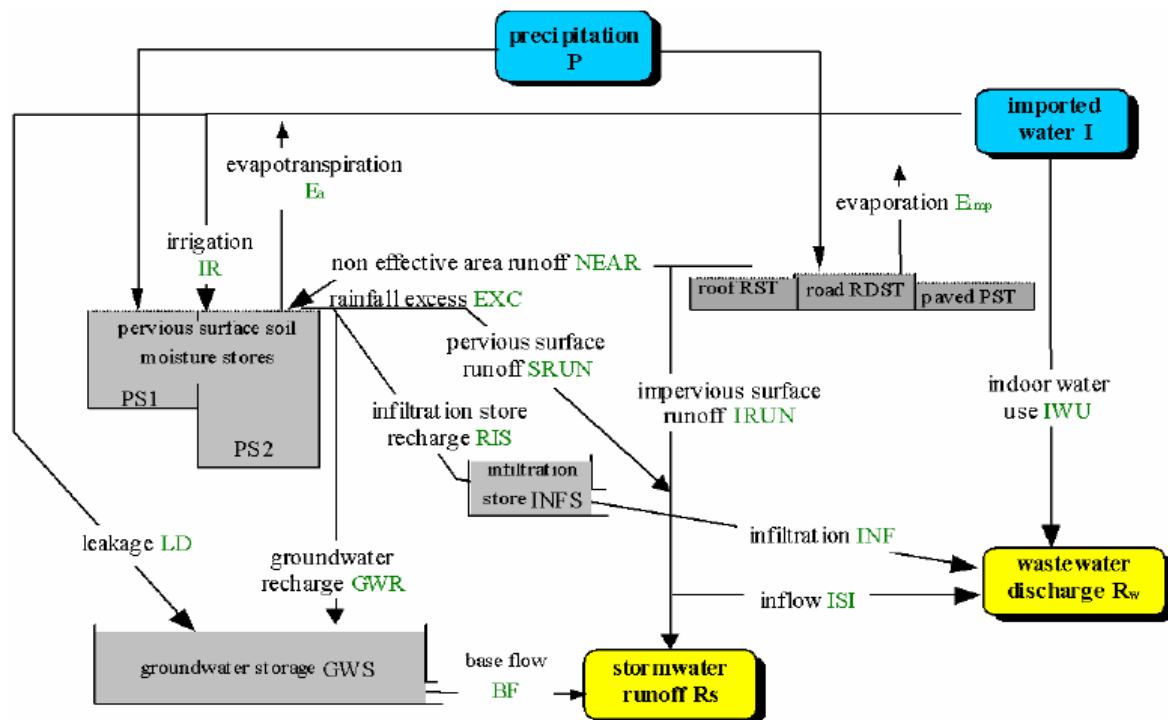
CLUSTERS	DESVIO PADRÃO (%)				
	Áreas Pavimentadas	Jardins	Telhados	Calçadas	Canteiros
ZC	6,82	1,45	7,12	0,38	0,38
SE	9,67	5,93	11,20	3,10	3,10
ZRV1/ZRV 2	6,26	6,57	5,00	22,26	22,26
ZRV 3	2,50	7,56	6,67	13,73	13,73
ZR3 1/ZR3 2/ZR3 3	4,67	7,31	7,32	10,01	10,01
ZR4 1/ZR4 2/ZR4 3	5,17	4,78	4,85	10,71	10,71

Os valores mostram que não há variação significativa entre uso da terra das quadras base, evidenciando a eficiência do método de mapeamento adotado neste trabalho.

3.4 DESCRIÇÃO DO MODELO

A Figura 18 ilustra a representação conceitual do ciclo urbano da água utilizada no *Aquacycle*.

⁷ Medida mais comum da dispersão. Mostra o quanto de variação ou "dispersão" existe em relação à média. Quanto mais próximo de zero for o resultado, menor é a variação.



STORAGE LEVELS

RST = roof surface storage level
 PST = paved surface storage level
 RDST = road surface storage level
 GWS = groundwater storage level
 INFS = infiltration storage level
 PS1 = pervious store 1 level
 PS2 = pervious store 2 level

Note:

GREEN capitals indicate processes that are represented by algorithms
 RED capitals indicate a measured Parameter
 BLUE Capitals represent a calibrated Parameter

Epc = 7mm

MAIN MODEL ALGORITHMS

BF = BRC.GWS
 $E_a = A1 \cdot \min\{(PS1/PS1_c) \cdot E_{pc}, E_p\} + (100 - A1) \cdot \min\{(PS2/PS2_c) \cdot E_{pc}, E_p\}$
 $E_{imp} = \max(E_p, RST) \cdot (roof_{area}/cluster_{area}) + \max(E_p, PST) \cdot (paved_{area}/cluster_{area}) + \max(E_p, RDST) \cdot (road_{area}/cluster_{area})$
 $EXC = \{ \max(PS1 - PS1_c, 0) \} \cdot A1 + \{ \max(PS2 - PS2_c, 0) \} \cdot (100 - A1)$
 $INF = IRC \cdot \sqrt{INFS}$
 $IR = \max(TG \cdot PS1_c - PS1, 0) \cdot A1 \cdot \%GI + \max(TG \cdot PS2_c - PS2, 0) \cdot (100 - A1) \cdot \%GI$
 $IRUN = ERA \cdot (P - (RIL + RST)) \cdot (roof_{area}/cluster_{area}) + EPA \cdot (P - (PIL + PST)) \cdot (paved_{area}/cluster_{area}) + ERDA \cdot (P - (RDIL + RDST)) \cdot (road_{area}/cluster_{area})$
 $ISI = \%I \cdot (SRUN + IRUN)$
 $IWU = I - IR - LD$
 $LD = \%L \cdot (IR + IWU) / (100 - \%L)$
 $NEAR = (100 - ERA) \cdot (P - (RIL + RST)) \cdot (roof_{area}/cluster_{area}) + (100 - EPA) \cdot (P - (PIL + PST)) \cdot (paved_{area}/cluster_{area}) + (100 - ERDA) \cdot (P - (RDIL + RDST)) \cdot (road_{area}/cluster_{area})$
 $GWR = BI \cdot EXC$
 $RIS = II \cdot EXC$
 $R_s = IRUN + SRUN - ISI + BF$
 $R_w = IWU + INF + ISI$
 $SRUN = EXC - RIS - GWR$

FIGURA 18 REPRESENTAÇÃO CONCEITUAL DO CICLO URBANO DA ÁGUA
 FONTE: MITCHELL (2005)

Na sequência são descritas as principais equações do *Aquacycle*, bem como suas premissas. Dado caráter inédito de aplicação de tal modelo no Brasil, julgou-se válido e necessário replicar, traduzindo e adaptando, o conteúdo da estrutura matemática de Mitchell (2005), que corresponde ao item 3.4 na íntegra, para melhor compreensão de sua estruturação de modelagem.

3.4.1 Escoamento fluvial

O escoamento fluvial é composto pelos escoamentos superficial e de base. O cálculo de escoamento superficial em áreas urbanas é feito separadamente para superfícies permeáveis (jardins e espaço público aberto) e impermeáveis (áreas pavimentadas, ruas e telhados).

O escoamento fluvial (R_s) é dado pela seguinte equação:

$$R_s = IRUN + SRUN + BF - ISI \quad (3)$$

onde $IRUN$ é o escoamento superficial das áreas impermeáveis, $SRUN$ é o escoamento superficial das áreas permeáveis, BF é escoamento de base e ISI é a entrada de águas pluviais no sistema de águas residuais. O ISI descreve as ligações clandestinas diretas de água pluvial na rede de esgoto.

3.4.1.1 Escoamento superficial de áreas impermeáveis

A dinâmica hídrica de superfícies impermeáveis se dá da seguinte maneira: perdas iniciais devido à interceptação e armazenamento, saturação e escoamento superficial. Utiliza-se o conceito de área impermeável eficaz para representar a proporção de superfícies impermeáveis que estão diretamente ligados ao sistema de drenagem de águas pluviais. O restante das superfícies impermeáveis - que não estão diretamente ligados ao sistema de drenagem - direciona o escoamento até superfícies permeáveis adjacentes. A porcentagem de superfícies impermeáveis que estão diretamente ligados ao sistema de drenagem varia muito. Mitchell (2005) sinaliza que muitos modelos de precipitação-escoamento de áreas urbanas utilizam o conceito de área impermeável eficaz.

O escoamento proveniente da área impermeável eficaz contribui para o escoamento superficial total de águas pluviais em áreas impermeáveis ($IRUN$), enquanto a quantidade restante ($NEAR$) flui sobre as superfícies permeáveis adjacentes. O calculado é realizado de acordo com as seguintes equações:

$$IRUN = ERA.(P - RIL + RST). \left(\frac{\text{área dos telhados}}{\text{área do cluster}} \right) + EPA.(P - PIL + PST). \left(\frac{\text{área pavimentada}}{\text{área do cluster}} \right) + ERDA.(P - RDIL + RDST). \left(\frac{\text{área das ruas}}{\text{área do cluster}} \right) \quad (4)$$

$$NEAR = (100 - ERA).(P - RIL + RST). \left(\frac{\text{área dos telhados}}{\text{área do cluster}} \right) + (100 - EPA).(P - PIL + PST). \left(\frac{\text{área pavimentada}}{\text{área do cluster}} \right) + (100 - ERDA).(P - RDIL + RDST). \left(\frac{\text{área das ruas}}{\text{área do cluster}} \right) \quad (5)$$

ERA é a percentagem de área de telhado eficaz, *P* é a precipitação, *RIL* é a perda inicial máxima da área de telhado, *RST* é o nível de armazenamento de superfície dos telhados, *EPA* é a percentagem de área pavimentada eficaz, *PIL* é a perda inicial máxima das áreas pavimentadas, *PST* é o nível de armazenamento de superfície das áreas pavimentadas, *ERDA* é a percentagem de área de rua eficaz, *RDIL* é a perda inicial máxima da área das ruas e *RDST* é o nível de armazenamento de superfície das ruas.

3.4.1.2 Escoamento superficial de áreas permeáveis

Quanto ao escoamento de áreas permeáveis, considera-se o modelo AWBM (BOUGHTON, 1993 *apud* MITCHELL, 2005), o qual se utiliza do conceito de áreas parciais de escoamento superficial e saturação.

O conceito de áreas parciais baseia-se na divisão de uma bacia hidrográfica em áreas que produzem e áreas que não produzem escoamento superficial durante um evento de chuva-vazão. Estas áreas variam de acordo com as condições de umidade antecedente na bacia, permitindo a variabilidade espacial de armazenamento de superfície. O excesso de umidade no solo (*EXC*) é calculado da seguinte maneira:

$$EXC = \{ \max(P + PS1 - PS1C, 0) \}. A1 + \{ \max(P + PS2 - PS2C, 0) \}. (100 - A1) \quad (6)$$

PS1 é o nível do armazenamento permeável 1 (que produz escoamento superficial), *PS1C* é a capacidade de armazenamento permeável 1, *PS2* é o

nível do armazenamento permeável 2 (que não produz escoamento superficial), $PS2C$ é a capacidade de armazenamento permeável 2 e $A1$ é a porcentagem de área de armazenamento permeável 1.

A umidade contida no solo é drenada até a área de armazenagem de águas subterrâneas, de acordo com sua função de recessão, que por sua vez gera escoamento de base (BF). A recarga de águas subterrâneas (GWR) é igual ao índice de escoamento de base (BI) multiplicado pelo excesso de água do solo (EXC), conforme abaixo:

$$GWR = BI.EXC \quad (7)$$

O escoamento de base (BF) é dado, portanto, pela seguinte equação:

$$BF = BRC.GWS \quad (8)$$

onde BRC é a constante de recessão do escoamento de base e GWS é o nível de armazenamento de águas subterrâneas.

A parcela do escoamento superficial permeável que contribui, portanto, para $SRUN$ é igual ao excesso de umidade do solo (EXC), menos a infiltração no solo (RIS), menos a recarga de água subterrânea (GWR):

$$SRUN = EXC - RIS - GWR \quad (9)$$

3.4.1.3 Entrada de águas pluviais no sistema de águas residuais

O *Aquacycle* assume que a entrada de águas pluviais no sistema de águas residuais possa ocorrer de duas maneiras: infiltração da água pluvial subterrânea através de fendas existentes na tubulação (INF); ou através da conexão direta na rede pluvial (IS). Ressalta-se novamente que o Brasil adota o sistema de drenagem e esgotamento sanitário denominado separador absoluto, definido por lei pela NBR 9649 (ABNT, 1986). Ou seja, em teoria os rios deveriam receber apenas águas pluviais e a rede de tratamento de esgoto

apenas esgoto doméstico e industrial. Sabe-se, no entanto, que o número de ligações clandestinas de esgoto na rede pluvial ou de águas pluviais na rede de esgoto é muito recorrente nas cidades brasileiras. *ISI*, portanto, na presente pesquisa, diferente dos cenários australianos que deram origem ao modelo *Aquacycle*, refere-se à ligações clandestinas de água pluvial na rede de esgoto. Quanto à *INF*, o *Aquacycle* assume que tal fenômeno ocorra durante períodos de excesso de armazenamento de umidade do solo, de acordo com as seguintes equações:

$$RIS = II.EXC \quad (10)$$

$$INF = IRC.\sqrt{INFS} \quad (11)$$

$$ISI = \%I.(SRUN + IRUN) \quad (12)$$

%I é a porcentagem de água importada, *II* é o índice de infiltração, *INF* é a infiltração de águas pluviais no sistema de águas residuais por meio de fissuras nas tubulações, *IRC* é a constante de recessão da infiltração, *INFS* é o nível de armazenagem de infiltração e *ISI* representa a água pluvial direcionada ao sistema de águas residuais por meio de ligação direta.

3.4.1.4 Irrigação

Além dos elementos anteriormente citados, é necessária ainda a inclusão da irrigação como componente de entrada no modelo de balanço hídrico urbano no cálculo do escoamento de águas pluviais. Isto porque a irrigação interfere nas condições de umidade antecedente do solo.

A necessidade de irrigação varia de acordo com as condições climáticas, tipos de plantas, tipo de solo e dimensões das áreas a serem irrigadas. A necessidade de irrigação do jardim (*IR*) utilizada no modelo *Aquacycle* é definida como quantidade de irrigação necessária para complementar a água de precipitação, de modo a manter a qualidade dos jardins. Há, portanto, um

nível mínimo de armazenamento de umidade do solo permitido (TG). O modelo irriga a área permeável sempre que o nível de armazenamento de umidade do solo cai abaixo de TG . O cálculo de IR é definido por:

$$IR = \max(TG.PS1c - PS1, 0).A1.\%GI + \max(TG.PS2c - PS2, 0).(100 - A1).\%GI \quad (13)$$

3.4.2 Evapotranspiração

Como este se trata de um modelo de balanço hídrico urbano, faz-se necessário calcular a evapotranspiração de áreas permeáveis e separadamente a evaporação de superfícies impermeáveis.

O método para cálculo evapotranspiração atual de áreas permeáveis (Ea) é fundamentado em Denmead e Shaw (1962). Esta abordagem assume que o fornecimento de água a uma planta é uma função linear de água disponível na zona de raiz. A quantidade máxima de evapotranspiração que pode ocorrer em um determinado dia é denominado taxa de evapotranspiração potencial (Ep). Evapotranspiração real é o montante efetivamente evapotranspirado em determinado dia, dada evapotranspiração potencial (Ep), teor de umidade do solo ($PS1$ e $PS2$) e a capacidade da cobertura vegetal de transpirar (EPC).

$$Ea = A1.\min\{(PS1/PS1c).Epc, Ep\} + (100 - A1).\min\{(PS2/PS2c).Epc, Ep\} \quad (14)$$

A evaporação das superfícies permeáveis ($Eimp$) é, por sua vez, calculada com a seguinte equação, dada relação entre nível de armazenamento de água nas superfícies impermeáveis (RST , PST e $RDST$) e área efetiva das superfícies impermeáveis (telhados, ruas e áreas pavimentadas):

$$Eimp = \max(Ep, RST). \left(\frac{\text{área dos telhados}}{\text{área do cluster}} \right) + \max(Ep, PST). \left(\frac{\text{área pavimentada}}{\text{área do cluster}} \right) + \max(Ep, RDST). \left(\frac{\text{área das ruas}}{\text{área do cluster}} \right) \quad (15)$$

3.4.3 Uso da água

Apesar da variação existente no perfil de uso de água de residência para residência, é possível estabelecer um padrão típico de uso para a área de estudo, com base na média de utilização em cada cômodo da residência e número de moradores por domicílio. A Tabela 7 apresenta um perfil de uso de água para a cidade de Camberra (Austrália), utilizado no tutorial do modelo, com valores dados em L/dia. Na entrada de dados do modelo, o mesmo perfil de uso da água é utilizado para todos os *clusters*. O que se varia é a média de ocupação por residência em cada *cluster*.

TABELA 7 PERFIL DE USO DE ÁGUA PARA A CIDADE DE CAMBERRA (AUSTRÁLIA) 2003

Nº de ocupantes	Cozinha (L/dia)	Banheiro (L/dia)	Lavabo (L/dia)	Lavanderia (L/dia)	Consumo Total (L/dia)
1	31	99	51	90	271
2	50	161	94	148	453
3	64	218	163	194	639
4	74	258	204	237	773
5	79	284	234	264	861
6	95	322	268	298	983
7	111	359	301	332	1103

FONTE: MITCHELL (2005)

No caso de a ocupação média não ser um número inteiro – 2,7, por exemplo – o *Aquacycle* realiza uma interpolação linear⁸ para calcular as taxas de uso de água da cozinha, banheiro, lavabo e lavanderia. O mesmo ocorre quando o número de ocupantes é maior que 7.

3.4.4 Vazamentos no sistema de abastecimento de água

A vazão de contribuição dos vazamentos no sistema de abastecimento de água (*LD*) varia de acordo com a idade e condições de cada sistema. O vazamento do sistema reticulado é assumido como proporcional ao uso de água (*IR + IWU*) de uma área. A água que vaza pode reabastecer o nível

⁸ Exemplo: se a ocupação média por domicílio = 2,7; uso de água na cozinha para 2 pessoas = 50 L/dia; e uso de água na cozinha para 3 pessoas = 64 L/dia, então: $50 \text{ L/d} + (64 \text{ L/d} - 50 \text{ L/d}) * (3 - 2,7) = 54,1 \text{ L/dia}$. O mesmo se dá com o perfil de uso dos demais cômodos da casa.

freático ou pode ser absorvida pela vegetação. A vazão de contribuição dos vazamentos do sistema de abastecimento de água é calculada através da seguinte equação:

$$LD = \%L.(IR + IWU)/(100 - \%L) \quad (16)$$

onde $\%L$ é o percentual de perda no abastecimento, IR é a necessidade de irrigação do jardim e IWU é o uso de água no interior das residências.

3.4.5 Água importada

O volume de água importada é igual à soma do uso no interior das residências (IWU), da irrigação (IR) e do volume perdido no abastecimento (LD).

$$I = IWU + IR + LD \quad (17)$$

3.4.6 Águas residuais

O volume de águas residuais (Rw) é igual à soma do uso de água no interior das residências (IWU), infiltração de águas pluviais no sistema de águas residuais (INF) e afluxo de águas pluviais no sistema de águas residuais provenientes de conexão direta (ISI). O modelo considera que o coeficiente de retorno da água de abastecimento para o esgoto é igual a 100%, salvo o volume utilizado para irrigação.

$$Rw = IWU + INF + ISI \quad (18)$$

3.4.7 Armazenamento de água nas superfícies impermeáveis

O cálculo do nível de armazenamento de superfícies impermeáveis deve considerar a condição antecedente da superfície no início da precipitação e, por conseguinte, o volume da perda inicial para cada tipo de superfície impermeável. Abaixo segue exemplo de cálculo para os telhados:

$$RST_t = RST_{t-1} + P - E_{imp\ telhado} - IRUN_{telhado} - NEAR_{telhado} \quad (19)$$

onde $E_{imp\ telhado}$ é a evaporação do telhado, $IRUN_{telhado}$ é o escoamento da área eficaz de telhado, $NEAR_{telhado}$ é o escoamento da área não eficaz do telhado e RST_{t-1} é o nível de armazenamento da condição antecedente. O cálculo para ruas e áreas pavimentadas é feito da mesma forma.

3.4.8 Armazenamento de água nas superfícies permeáveis

O nível de armazenamento de água no solo para áreas permeáveis é calculado para área permeável 1 (PS1) e área permeável 2 (PS2). Segue exemplo para PS1:

$$PS1_t = PS1_{t-1} + P + IR + NEAR - Ea_{PS1} - EXCPS1 \quad (20)$$

Ea_{PS1} é a evapotranspiração atual da área permeável 1, $EXCPS1$ é o excesso de umidade no solo na área permeável 1 e $PS1_{t-1}$ é o nível de armazenamento do dia anterior. O armazenamento da área permeável 2 é calculado da mesma forma.

3.4.9 Recarga do aquífero freático

A recarga do nível freático (GWS) é dada pela soma do armazenamento de águas subterrâneas das condições antecedentes (GWS_{t-1}), da recarga de

águas subterrâneas (GWR) e do índice de vazamentos no sistema de abastecimento de água (LD), menos o escoamento de base (BF):

$$GWSt = GWSt - 1 + GWR + LD - BF \quad (21)$$

3.4.10 Sistemas alternativos para uso e reaproveitamento de água disponíveis no *Aquacycle*

O *Aquacycle* disponibiliza ferramentas para inserção de três diferentes possibilidades de armazenagem e uso de águas pluviais e reuso de águas residuais. Nesta seção do trabalho estão descritas as três alternativas. Esta pesquisa, no entanto, não se utiliza de tais ferramentas para simulação de cenários. Tal capítulo foi escrito, portanto, como parte da descrição do modelo e apresentação de possibilidades futuras para esta pesquisa.

3.4.10.1 Armazenamento e utilização de águas pluviais

Tanques de armazenamento de águas pluviais podem ser incluídos na modelagem na escala bloco, *cluster* ou bacia de drenagem. Eles são representados como tanques simples de armazenagem, e sua capacidade é dada pelas dimensões de cada tanque. O transbordamento do mesmo se dá sempre que a entrada de água excede o volume disponível para armazenagem. Toda a água dentro do tanque é assumida como disponível para utilização. Seu nível de armazenamento é, no entanto, intermitente, tendo em vista a dependência das condições climáticas (eventos de precipitação). A operação do armazenamento de águas pluviais pode ser representada pela seguinte equação de balanço hídrico:

$$St = St - 1 + Insw - ff - Csw - Osw - Ep + P \quad (22)$$

onde que St é o volume de armazenamento de águas pluviais, $St-1$ é o volume armazenado no dia anterior, $Insw$ é a entrada de águas pluviais, ff é a primeira descarga de águas pluviais desviada da entrada⁹, Csw é o volume de água retirada do reservatório para consumo, Osw é o excesso de água do tanque ou volume transbordado, Ep é a quantidade de água evaporada do tanque, P é a precipitação no tanque quando aberto.

A Figura 19 ilustra a representação conceitual do funcionamento de um tanque de armazenamento de águas pluviais hipotético (cisterna) disponível no *Aquacycle*.

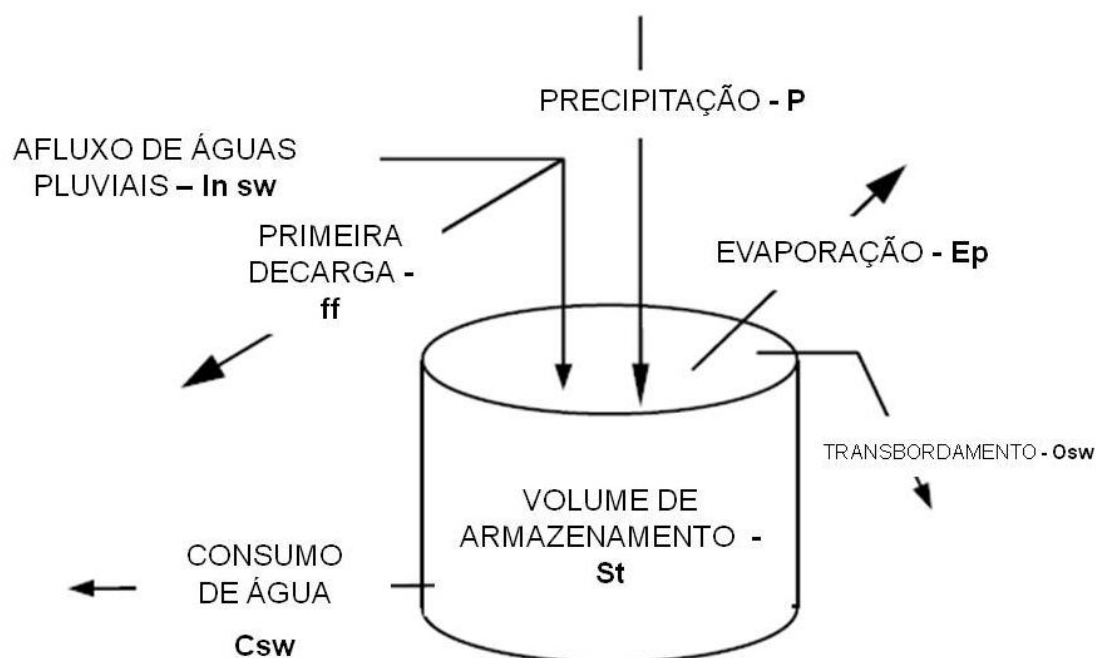


FIGURA 19 REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM TANQUE DE ÁGUAS PLUVIAIS
FONTE: MITCHELL (2005)

3.4.10.2 Tratamento e armazenamento de águas residuais

Diferente do armazenamento de águas pluviais – volume intermitente –, o reabastecimento do tanque de águas pluviais é constante. O escoamento de efluentes tratados pode ser eliminado ou armazenado para posterior utilização.

⁹ ff é inserido no sistema pois, em geral, o volume inicial de escoamento superficial gerado sobre superfícies impermeáveis contém grande carga de poluentes. A fim de aumentar a qualidade global da água que entra no tanque, uma quantidade inicial do escoamento pode ser desviada da entrada.

A operação de tratamento e armazenamento de águas residuais pode ser representada conceitualmente pela Figura 20 e pela seguinte equação de balanço hídrico:

$$W_t = W_{t-1} + In_{ww} - C_{ww} - O_{ww} - E_p + P \quad (23)$$

onde W_t é o volume de armazenamento de águas residuais, W_{t-1} é o volume armazenado no dia anterior, In_{ww} é o afluxo de águas residuais no tanque de armazenamento de águas residuais, C_{ww} é o consumo de água proveniente do tanque de águas residuais, O_{ww} é o excesso de água do tanque, E_p é a quantidade de água evaporada do tanque e P é a precipitação direta no tanque (no caso de tanque aberto).

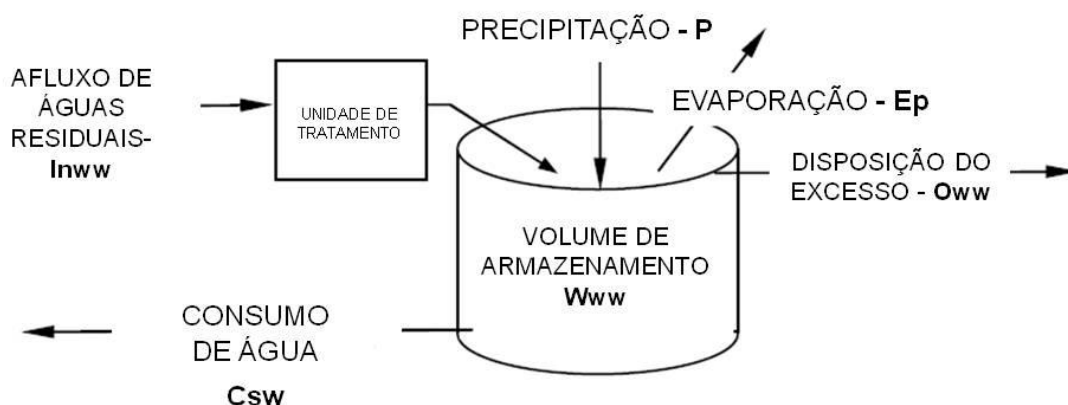


FIGURA 20 REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM TANQUE DE ÁGUAS RESIDUAIS
FONTE: MITCHELL (2005)

3.4.10.3 Armazenamento e utilização de água do aquífero de modo artificial

A recarga artificial de um aquífero é o processo no qual a ação humana é responsável pela transferência de água de superfície para o sistema de águas subterrâneas para posterior utilização. Um aquífero tem capacidade de armazenagem fixa e finita e pode receber a água através de um poço de injeção (Figura 21). A prática da recarga artificial de aquíferos pode ser adotada para aumentar o rendimento de um aquífero que já é explorado ou

para tirar proveito de sua capacidade de armazenamento natural, em vez de depender de armazenamento de superfície. A operação do sistema de armazenamento e recuperação aquífera pode ser representada pelas seguintes equações de balanço hídrico:

$$ASt = ASt - 1 + Ina - Ij + R - Ca - Oa - E + P \quad (24)$$

$$At = At - 1 + Ij - R \quad (25)$$

onde ASt é o volume armazenado no tanque de superfície do sistema de abastecimento do aquífero, $ASt-1$ é o volume armazenado no tanque de superfície do sistema de abastecimento do aquífero no dia anterior, Ina é a entrada de água para recarga do aquífero, Ij é o volume de água injetada no aquífero, Ca é o consumo de água proveniente do armazenamento no aquífero, Oa é o excesso de água do tanque de superfície, E é a quantidade de água evaporada do tanque de superfície, P é a precipitação direta no tanque de superfície, At é o volume armazenado no aquífero e $At-1$ o volume armazenado no aquífero no dia anterior.

Destaca-se que o *Aquacycle* usa o armazenamento de águas pluviais na escala *cluster* no tanque de armazenamento de superfície. Quando o tanque de superfície passa de 50% de sua capacidade, direciona a água para o aquífero (Ri). O mesmo se dá quando a marca cai de 50%, direcionando a água do aquífero para o tanque de superfície (Ra).

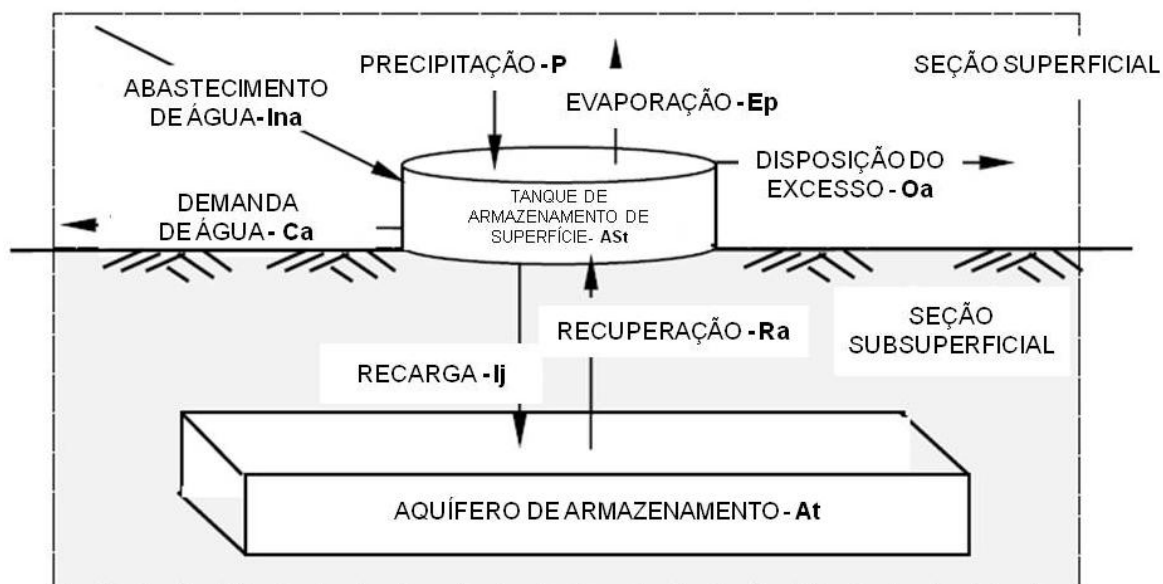


FIGURA 21 REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA DO AQUÍFERO
 FONTE: MITCHELL (2005)

3.4.10.4 Avaliação do desempenho de um sistema de reutilização

O *Aquacycle* avalia o desempenho de um sistema de reutilização de água através do cálculo de confiabilidade evento (Re), confiabilidade volumétrica (Rv) e taxa de utilização (Ur), todos dados em porcentagem. Re é a medida mais precisa quando a demanda é constante. Quando, no entanto, a demanda é altamente variável, Rv torna-se mais confiável.

Re é definida como:

$$Re = 100 \cdot (1 - p/N) \quad (26)$$

onde p é o número total de falhas de eventos no período total de simulação e N é o período simulado. Uma falha de evento ocorre quando o esquema de reutilização é incapaz de suprir a demanda total de água em um determinado intervalo de tempo.

Rv , por sua vez, é definido como:

$$Rv = 100 \cdot Sv/Dv \quad (27)$$

sendo S_v o volume total fornecido durante o período de tempo N e D_v o volume de demanda para o mesmo período.

Quando a demanda de água excede a oferta de uma fonte particular, uma medida mais útil de desempenho é a taxa de utilização (U_r), definida como:

$$U_r = 100 \cdot u / S_v \quad (28)$$

u é o montante de água utilizado em um período.

3.4.10.5 Otimização do tamanho de um tanque

As dimensões de tanques de armazenamento de água cabíveis à área de estudo, nas três escalas espaciais, podem ser otimizadas por quem opera o modelo, de acordo com base em R_v na função *Otimização* disponível no modelo.

3.4.10.6 Transferência de água entre *clusters*

O modelo *Aquacycle* apresenta a possibilidade de transferência de águas residuais ou pluviais entre *clusters* para reuso. Um valor positivo para a "transferência de água" indica a presença de água proveniente de outro *cluster* para reutilização. Um valor negativo, por sua vez, indica diminuição do volume de água, direcionado a outro *cluster*.

3.4.11 Principais premissas e limitações do modelo

Após a descrição das principais equações que estruturam *Aquacycle*, são reproduzidas as premissas elementares do modelo de Mitchell (2005). Tais premissas, conforme anteriormente exposto no item 2.2, são simplificações da

realidade inerentes à modelagem ambiental, pois ao simular fenômenos da natureza matematicamente, é-se forçado a aceitar certas condições que simplifiquem o problema de forma a torná-lo tratável (LIMA, 2010).

As principais premissas de Mitchell (2005) em relação à precipitação são: considera-se apenas um episódio de precipitação por dia, sendo ele no início da manhã; a precipitação se dá de modo uniforme no espaço, não sendo consideradas as chuvas localizadas.

Em relação à umidade do solo, considera-se que tal volume de água evapora sempre no início da manhã. Quanto à evaporação de áreas impermeáveis, o fenômeno se dá ao fim de cada dia. Concebe-se ainda que os valores para perdas iniciais em áreas impermeáveis eficazes não variam ao longo do ano.

Quanto ao escoamento proveniente de áreas impermeáveis não eficazes, considera-se que: áreas pavimentadas não eficazes direcionam água às áreas permeáveis do mesmo bloco; metade do escoamento proveniente da área de telhado não eficaz direciona-se à área permeável do bloco e a outra metade para a rede de drenagem do *cluster*, sendo que quando não há área permeável no bloco, todo o volume direciona-se à rede de drenagem do *cluster*.

A última premissa refere-se ao escoamento superficial de áreas permeáveis, que na estrutura de modelagem, não ocorre até que a capacidade de armazenamento da água no solo seja excedida. Tal fato pode, eventualmente, superestimar a capacidade de infiltração e subestimar o escoamento superficial durante chuvas intensas.

3.5 DADOS DE ENTRADA PARA MODELAGEM

Para modelagem, o *Aquacycle* requer a entrada de seis arquivos de dados referentes às características da área de estudo. São eles: dados climáticos, perfil de uso de água, “bloco, *cluster* e bacia de drenagem”, parâmetros medidos, níveis iniciais de armazenamento de água e parâmetros de calibração. Tais dados bem como a obtenção de cada um deles para a área

de estudo nos cenários determinados serão detalhadamente e individualmente descritos nesta seção do trabalho.

3.5.1 Dados climáticos

Para modelagem hídrica foram utilizados dados climáticos diários de precipitação e evapotranspiração potencial entre os anos de 2002 e 2013. Tal recorte temporal se deu em função da disponibilidade de dados observados na estação convencional 83842 do INMET (Curitiba - localização indicada na FIGURA 9), com ausência de dados para 2001 a várias lacunas em datas anteriores.

Para realização do cálculo de evapotranspiração potencial foram utilizados os seguintes dados diários da estação convencional 83842 (INMET Curitiba): temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, evaporação, temperatura compensada, umidade relativa e velocidade do vento. O cálculo foi realizado através do método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998).

3.5.2 Perfil de uso da água

Conforme conteúdo exposto no item 3.4.3, o arquivo com perfil de uso de água fornece dados sobre consumo de água per capita em L/dia, de acordo com o número de moradores em cada residência. O mesmo perfil é utilizado para todos os *clusters*.

No ano de 2014, a SANEPAR forneceu à Gazeta do Povo o consumo de água per capita por bairro de Curitiba (BREMBATTI, 2014), mostrando que o consumo varia muito de bairro para bairro (FIGURA 22). Bairros que abrigam população com maior rendimento nominal mensal, como é o caso do Batel (290,7 L/hab/dia), Mossunguê (262,8 L/hab/dia), Hugo Langue (253,4 L/hab/dia), Cabral (241,5 L/hab/dia) e Bigorrilho (236,9 L/hab/dia) apresentam maior consumo per capita. Por outro lado, bairros que abrigam população com

menor rendimento nominal mensal, à exemplo São Miguel (81,4 L/hab/dia), Riviera (90 L/hab/dia), Sítio Cercado (100,2 L/hab/dia) e Boqueirão (101,7 L/hab/dia), apresentam as menores médias de consumo per capita. Esta fonte foi utilizada como base para definição do perfil de uso de água para área de estudo.

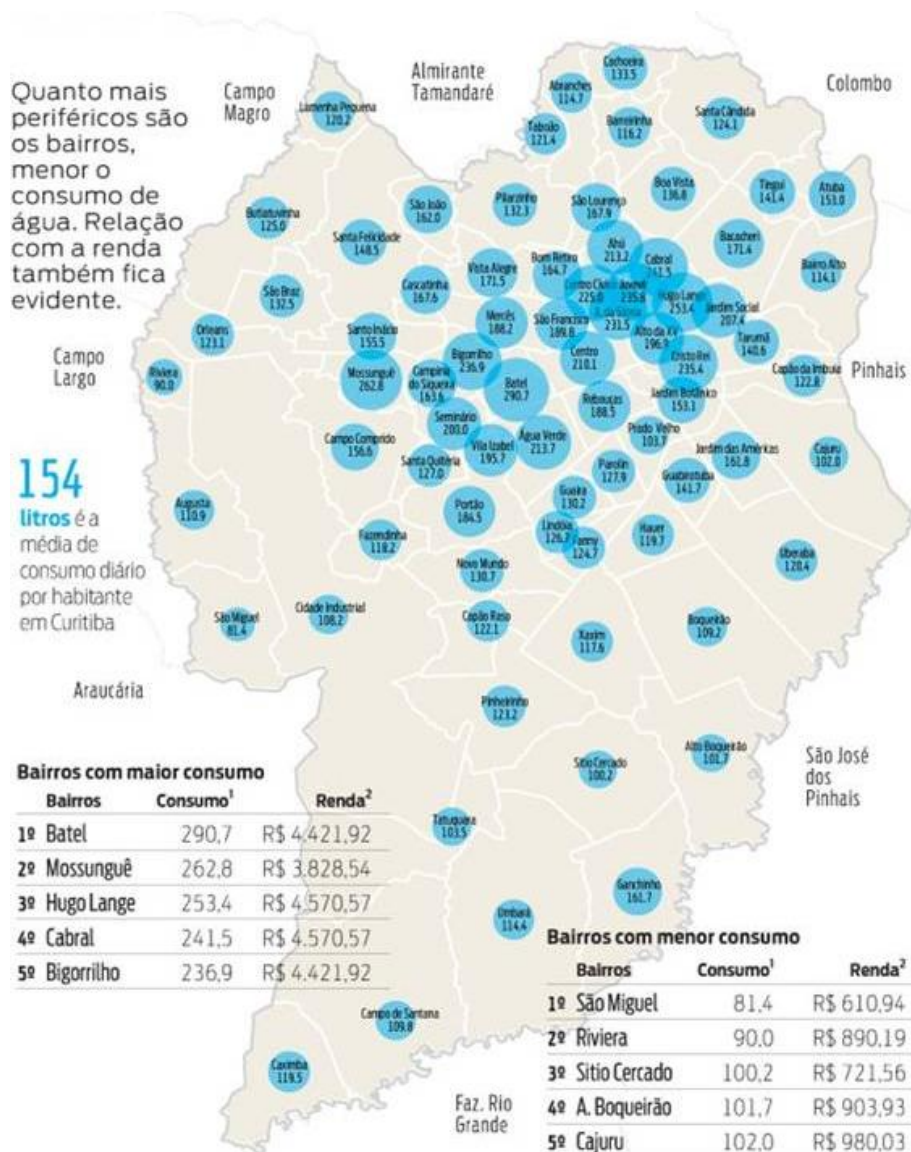


FIGURA 22 CONSUMO DE ÁGUA PER CAPITA POR BAIRRO DE CURITIBA
FONTE: BREMBATTI (2014)

Como os limites da bacia não correspondem aos limites dos bairros, o cálculo do consumo de água per capita foi feito através de média ponderada. O peso atribuído a cada *cluster* para cálculo da média adveio do número de moradores por bairro. O valor obtido para área de estudo foi de 200 L/hab/dia.

O cálculo de consumo para residências com diferentes números de habitantes foi feito de modo linear (TABELA 8). A exemplo, uma casa com 1 habitante consome 200 L/dia, uma casa com 2 habitantes 400 L/dia, e assim por diante.

TABELA 8 PERFIL RESIDENCIAL DE USO DE ÁGUA PARA A BACIA DO RIO BELÉM

Nº de ocupantes	Cozinha (L/dia)	Banheiro (L/dia)	Lavabo (L/dia)	Lavanderia (L/dia)	Consumo Total (L/dia)
1	50	80	40	30	200
2	100	160	80	60	400
3	150	240	120	90	600
4	200	320	160	120	800
5	250	400	200	150	1000
6	300	480	240	180	1200
7	350	560	280	210	1400

3.5.3 Bloco, *cluster* e bacia de drenagem

O arquivo *bloco* contém uma sequência de 33 dados - para cada *cluster* simulado - referentes à prática de irrigação de jardins, existência de tanques de águas pluviais e residuais na escala bloco, suas dimensões e utilização nas residências. Todos os blocos de unidades dentro do *cluster* têm as mesmas modalidades, mas essas regras podem diferir significativamente entre *clusters* (MITCHELL, 2005). Os dados de entrada requeridos para cada *cluster*, juntamente com os valores de entrada neste estudo, encontram-se listados na Tabela 9.

Devido à dificuldade de mensuração da existência cisternas e tanques de reaproveitamento de águas residuais, e também por contemplar áreas de Curitiba que foram urbanizadas antes do Decreto 293 da lei nº 10.785/03¹⁰ (CURITIBA, 2006), o qual prevê a obrigatoriedade de instalação de cisternas

¹⁰ DECRETO Nº 293: regulamenta a lei nº 10.785/03 e dispõe sobre os critérios do uso e conservação racional da água nas edificações e dá outras providências. Artigo 2: Para o licenciamento de construções no Município, fica obrigatória que no projeto de instalações hidráulicas seja prevista a implantação de mecanismo de captação das águas pluviais, nas coberturas das edificações, as quais deverão ser armazenadas para posterior utilização em atividades que não exijam o uso de água tratada.

em novas construções ou reformas, tais elementos foram considerados inexistentes na área de estudo para fins de modelagem do balanço hídrico. O mesmo se deu com a prática de irrigação, que também foi considerada nula em função do perfil climático da cidade de Curitiba, com regime de chuvas bem distribuído ao longo do ano.

TABELA 9 BLOCOS: SEQUENCIA DE DADOS DE ENTRADA

SEQUENCIA DE DADOS	UNIDADE	RESPOSTA
A irrigação do jardim é feita com água importada?	0 ou 1 ¹¹	0
Capacidade de armazenamento do tanque de águas pluviais	m ³	0
Superfície exposta do tanque de águas pluviais	m ²	0
Primeira descarga do tanque de águas pluviais	m ³	0
A água quente doméstica vem do tanque de águas pluviais?	0 ou 1	0
A água fria utilizada na cozinha vem do tanque de águas pluviais?	0 ou 1	0
A água fria utilizada no banheiro vem do tanque de águas pluviais?	0 ou 1	0
A água fria utilizada na lavanderia vem do tanque de águas pluviais?	0 ou 1	0
A água fria utilizada no lavabo vem do tanque de águas pluviais?	0 ou 1	0
A água utilizada para irrigação do jardim vem do tanque de águas pluviais?	0 ou 1	0
Água residual da cozinha utilizada para irrigação de subsuperfície?	0 ou 1	0
Água residual do banheiro utilizada para irrigação de subsuperfície?	0 ou 1	0
Água residual da lavanderia utilizada para irrigação de subsuperfície?	0 ou 1	0
Capacidade de armazenamento do tanque de tratamento de águas residuais	m ³	0
Superfície exposta do tanque de tratamento de águas residuais	m ²	0
Existe tratamento de águas residuais da cozinha no bloco?	0 ou 1	0
Existe tratamento de águas residuais do banheiro no bloco?	0 ou 1	0
Existe tratamento de águas residuais da lavanderia no bloco?	0 ou 1	0
Existe tratamento de águas residuais do lavabo no bloco?	0 ou 1	0
Água do toalete vem de um tanque de armazenamento de águas residuais?	0 ou 1	0
Irrigação do jardim vem de um tanque de armazenamento de águas residuais?	0 ou 1	0
Transbordamento do tanque de tratamento de águas residuais para a rede de esgoto?	0 ou 1	0
Existe transbordamento do tanque de tratamento de águas residuais para a rede pluvial?	0 ou 1	0
O escoamento superficial que ocorre nos blocos vai para um tanque de armazenamento no <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0
A água dos toaletes vem de um tanque de armazenamento de águas pluviais do <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0

continua

¹¹ “0” corresponde a não e “1” corresponde a sim.

TABELA 9 BLOCOS: SEQUENCIA DE DADOS DE ENTRADA

continuação		
SEQUENCIA DE DADOS	UNIDADE	RESPOSTA
A água para irrigação vem de um tanque de armazenamento de águas pluviais do <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0
As águas residuais dos blocos são drenadas para um tanque de armazenamento do <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0
A água dos toaletes vem de um tanque de armazenamento de águas residuais do <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0
A água para irrigação vem de um tanque de armazenamento de águas residuais do <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0
A água dos toaletes vem de um tanque de armazenamento de águas pluviais da bacia?	0 ou 1	0
A água para irrigação vem de um tanque de armazenamento de águas pluviais da bacia?	0 ou 1	0
A água dos toaletes vem de um tanque de armazenamento de águas residuais da bacia?	0 ou 1	0
A água para irrigação vem de um tanque de armazenamento de águas residuais da bacia?	0 ou 1	0

FONTE: MITCHELL (2005)

As mesmas premissas com relação à existência de cisternas e práticas de irrigação na escala bloco foram adotadas com o arquivo *cluster*. Os 19 dados requeridos no arquivo, encontram-se listados na Tabela 10.

TABELA 10 *CLUSTERS*: SEQUENCIA DE DADOS DE ENTRADA

SEQUENCIA DE DADOS	UNIDADE	RESPOSTA
Capacidade de armazenamento do tanque de águas pluviais do <i>cluster</i>	m ³	0
Superfície exposta do tanque de águas pluviais do <i>cluster</i>	m ²	0
Primeira descarga do tanque de águas pluviais do <i>cluster</i>	m ³	0
Escoamento superficial das ruas vai para um tanque de armazenamento de águas pluviais no <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0
Existe coleta de águas pluviais de <i>clusters</i> a montante?	0 ou 1	0
Capacidade de armazenamento do tanque de águas residuais do <i>cluster</i>	m ³	0
Superfície exposta do tanque de águas residuais do <i>cluster</i>	m ²	0
Coleta de águas residuais de <i>clusters</i> a montante?	0 ou 1	0
Transbordamento do tanque de tratamento de águas residuais para a rede de esgoto?	0 ou 1	0
Transbordamento do tanque de tratamento de águas residuais para a rede pluvial?	0 ou 1	0
Capacidade de armazenagem e reabastecimento do aquífero	m ³	0
Armazenamento máximo do aquífero e taxa de recarga	m ³ /dia	0
Armazenamento máximo do aquífero e taxa de recuperação	m ³ /dia	0
Irrigação de espaço público aberto com água importada?	0 ou 1	0
Irrigação de espaço público aberto com água de tanque pluvial de algum outro <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0
Irrigação de espaço público aberto com água de tanque de águas residuais de algum outro <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0
Irrigação de espaço público aberto com água de tanque pluvial da bacia?	0 ou 1	0

continua

TABELA 10 *CLUSTERS*: SEQUENCIA DE DADOS DE ENTRADA

continuação		
SEQUENCIA DE DADOS	UNIDADE	RESPOSTA
Irrigação de espaço público aberto com água de tanque de águas residuais da bacia?	0 ou 1	0
O escoamento das águas pluviais vai para algum tanque de armazenamento no <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0

FONTE: MITCHELL (2005)

O arquivo *bacia de drenagem*, por sua vez, contém detalhes de uso e existência de tanques de reaproveitamento de águas residuais e pluviais na escala bacia hidrográfica. Como o caso dos arquivos anteriores, os valores também foram nulos. Além da sequência de 04 dados requisitados, listados na Tabela 11, foi necessário inserir a área total da área de estudo em *ha*.

TABELA 11 BACIA DE DRENAGEM: SEQUENCIA DE DADOS DE ENTRADA

SEQUENCIA DE DADOS	UNIDADE	RESPOSTA
Área da bacia	ha	4263,84
0	0	0
Capacidade do tanque de armazenamento de águas pluviais da bacia	m ³	0
Área da superfície exposta do tanque de armazenamento de águas pluviais da bacia	m ²	0
Primeira descarga da captação de águas pluviais	m ³	0
Capacidade do tanque de armazenamento de águas residuais da bacia	m ³	0
Área da superfície exposta do tanque de armazenamento de águas residuais da bacia	m ²	0
Existe vazamento de águas residuais para o sistema de captação de águas pluviais?	0 ou 1	0

FONTE: MITCHELL (2005)

3.5.4 Parâmetros espaciais

O arquivo de parâmetros espaciais contém uma sequência de 14 dados, com informações referentes à quantidade de lotes, média de ocupação por domicílio, uso da terra, porcentagem de área irrigada e outras informações referentes ao uso e abastecimento de água, na escala *cluster* (TABELA 12).

TABELA 12 PARÂMETROS MEDIDOS: SEQUÊNCIA DE DADOS DE ENTRADA

SEQUENCIA DE DADOS	UNIDADE	OBTEÇÃO DE DADOS
Numero de blocos no <i>cluster</i>	n°	Número de lotes
Media de ocupação	n°	*
Área média dos blocos	m²	Mapeamento de uso da terra
Área média de jardim nos blocos	m²	Mapeamento de uso da terra
Área média de telhados nos blocos	m²	Mapeamento de uso da terra
Área média de áreas pavimentadas nos blocos	m²	Mapeamento de uso da terra
Porcentagem de jardins irrigados nos blocos	%	0
Área total do <i>cluster</i>	ha	Mapeamento de uso da terra
Área das ruas no <i>cluster</i>	ha	Mapeamento de uso da terra
Área do espaço público aberto no <i>cluster</i>	ha	Mapeamento de uso da terra
Porcentagem de espaço público aberto irrigado	%	0
Taxa de perda água na rede de abastecimento publico	%	CURITIBA(2013)
Águas pluviais do <i>cluster</i> fluem para outro <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0
Águas residuais do <i>cluster</i> fluem para outro <i>cluster</i> ?	0 ou 1	0

FONTE: MITCHELL (2005)

O número de blocos por *cluster* foi definido com base no mapa digital *planta cadastral*, disponibilizado por IPPUC (2013), a qual possui a divisão por lotes da cidade de Curitiba. Cada lote foi, portanto, considerado como um bloco. *Como a área de estudo contempla um importante número de estabelecimentos comerciais, industriais e instituições públicas, a média de ocupação por domicílio em cada *cluster* não corresponde ao número real, sendo necessário incluir a água consumida não apenas nos domicílios, como o modelo permite, mas em todos os estabelecimentos beneficiados pelo abastecimento de água potável da área de estudo.

A partir dos volumes micromedidos de água potável por zona de pressão, disponibilizados pela SANEPAR (2012) foi possível identificar o volume de água consumido em cada *cluster*. Este volume foi dividido pelo consumo de água per capita anteriormente definido (200 L/hab/dia) e então, atribuídos para os blocos correspondente. Ou seja, para adequar-se ao formato de estrada de dados no modelo, o uso da água não residencial foi contabilizado aumentando-se artificialmente a população residente.

Os dados referentes ao uso da terra foram obtidos através do mapeamento descrito no item 3.3. A partir do mapeamento da área total de

cada categoria em cada uma das unidades de resposta hidrológica foi dividida pela quantidade de blocos nelas contidas.

Quanto à porcentagem de perda de água potável no abastecimento público, consta no Plano Municipal de Saneamento Básico da Prefeitura de Curitiba a seguinte informação: “O índice de perdas da rede de distribuição de água em Curitiba, de 39,4%, também está mais elevado que a média nacional (38,8%) e que o índice da concessionária responsável pelo abastecimento (33,1%)” (CURITIBA, 2013, p.105). No presente trabalho, o valor foi arredondado para 40%, dada melhor resposta de desempenho na modelagem.

Por se tratar de um modelo australiano, *Aquacycle* não possui alternativa de entrada de esgoto na drenagem pluvial. Apesar de ilegal, esta é infelizmente uma situação bastante usual nas cidades brasileiras e uma questão muito recorrente na bacia hidrográfica do rio Belém (CURITIBA, 2013; BRASÍLIO, 2005; LARA 2014; BOLLMAN E EDWIGES, 2008), que hoje classifica-se como rio muito poluído e desenquadrado da Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005) devido à poluição proveniente de esgotos domésticos, industriais e resíduos sólidos.

Como se trata de um volume significativo e influente na dinâmica hídrica na área de estudo, foi necessário incluí-lo na modelagem. A solução encontrada para simulação no modelo foi adicioná-lo junto à perda de água no abastecimento de água potável, tendo em vista que seu volume soma-se ao escoamento de base e, por conseguinte, à vazão do rio.

Dados oficiais da Prefeitura de Curitiba e do IBGE possuem discordâncias da definição da porcentagem de esgoto lançado diretamente do rio Belém. Segundo Plano Diretor de drenagem da bacia do Belém, no ano de 1999, apenas 39% do esgoto gerado em Curitiba era tratado. A projeção para o ano de 2015 era de coleta e tratamento de 65% do esgoto produzido (SUDERSHA, 2002). De acordo com o CENSO 2010, apenas 130 residências possuem ligação irregular de esgoto na rede pluvial na área de estudo, valor considerado ínfimo frente à real situação de contaminação do rio Belém.

Estudos de Fendrich (2002) diagnosticaram que no ano de 2002, cerca de 40% do esgoto produzido na bacia do rio Belém era lançado diretamente no rio sem tratamento. De acordo com o melhor desempenho da modelagem no processo de calibração do balanço hídrico, o volume adotado neste trabalho

para o período em estudo foi de 46% de todo o esgoto produzido lançado diretamente no rio.

3.5.5 Níveis iniciais de armazenamento

Com a mesma justificativa exposta no item 3.5.3, os 05 parâmetros da categoria *níveis iniciais de armazenamento* foram considerados nulos (TABELA 13).

TABELA 13 NÍVEIS INICIAIS DE ARMAZENAMENTO: SEQUÊNCIA DE DADOS DE ENTRADA

SEQUENCIA DE DADOS	UNIDADE	RESPOSTA
Nível de armazenamento inicial dos tanques nos blocos	m ³	0
Nível de armazenamento de águas residuais tratadas nos blocos	m ³	0
Nível de armazenamento de águas pluviais no <i>cluster</i>	m ³	0
Nível de armazenamento de águas residuais tratadas no <i>cluster</i>	m ³	0
Nível de armazenamento do aquífero (escala <i>cluster</i>)	m ³	0

FONTE: MITCHELL (2005)

3.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Como o *Aquacycle* não possui auto-calibração este procedimento é realizado de forma manual. Trata-se também de um processo não linear, tendo em vista as três diferentes espécies de saída de dados – escoamento de águas pluviais, escoamento de águas residuais e consumo de água. Mitchell (2005) sugere, portanto, uma abordagem interativa de calibração.

As estimativas iniciais dos parâmetros devem ser verificadas a partir do conhecimento da área de estudo e experiência de modelagem, sendo posteriormente ajustadas de modo a confrontar o hidrograma observado com o simulado. Uma alternativa para comparação de vazões é a função de boa replicação de quantidade (SIM/REC).

SIM (soma do escoamento simulado) é dividido por *REC* (soma do escoamento medido), utilizando-se de escala de tempo anual para esta equação. Se $SIM/REC = 1$, então o escoamento medido é igual ao escoamento

simulado. Isto não significa, no entanto, que eles possuam o mesmo padrão temporal. Para resultados de SIM/REC entre 0,98 e 1,02 a simulação é considerada ótima. Valores entre 0,90 e 1,10 exprimem simulações consideradas aceitáveis.

Para avaliação da simulação também é utilizado o cálculo do coeficiente de eficiência (E), que exprime a porcentagem de variância de escoamento medido e simulado, definido como:

$$E = (\sum_{i=1}^n (REC_i - \overline{REC})^2 - \sum_{i=1}^n (REC_i - SIM_i)^2) \div (\sum_{i=1}^n (REC_i - \overline{REC})^2) \quad (29)$$

onde \overline{REC} é o valor médio registrado no período de tempo selecionado, REC_i é o valor medido no tempo i e SIM_i é o valor simulado no tempo i .

Valores negativos indicam simulação ruim. Valores próximos a 1 indicam que o modelo pode reproduzir satisfatoriamente as vazões medidas, sendo preferíveis valores maiores que 0,60.

O arquivo *parâmetros de calibração* é composto por uma sequência de 16 dados, elencados, juntamente com os valores resultantes da calibração neste estudo, na Tabela 14. Os dez primeiros referem-se à calibração do escoamento pluvial, os três seguintes ao escoamento residual e os dois últimos ao uso de água.

Para calibração do modelo na bacia do rio Belém no período selecionado, foi necessária a adoção de algumas premissas, elaboradas estritamente para a presente pesquisa, sendo que algumas delas resultam em simplificações da realidade, traduzidas em limitações na modelagem. As premissas são as seguintes:

- Os solos do *cluster* 8, localizado na porção norte da bacia, são oriundos do Complexo Granítico-Gnáissico, portanto, são mais permeáveis que os solos dos demais *clusters*.
- Os solos dos *clusters* 2 3 4 6 7 9 10 11 12 13 e 14, originários da Formação Guabirota e Sedimentos Recentes¹² possuem baixa permeabilidade natural.
- Os solos dos *clusters* 1 e 5 são originários da Formação Guabirota e Sedimentos Recentes, porém possuem menor grau de urbanização. Por este motivo, a capacidade de infiltração de água no solo é um pouco maior que os demais *clusters* nesta condição de permeabilidade natural.
- A perda inicial máxima¹³ nos telhados é igual a 2,3 mm/dia. Para ruas e áreas pavimentadas, o valor é igual a 2,4 mm/dia.
- Toda área de rua é 100% eficaz.
- *INF* é igual a zero, considerando a equiparação de volumes entre *INF* e o vazamento de esgoto no solo via fissuras na tubulação, não descrito na estrutura matemática do modelo.
- Práticas de irrigação de jardins e espaço público aberto foram desconsideradas na modelagem.

Para determinação da porcentagem de área de telhado e área pavimentada eficaz em cada *cluster* foi utilizada a equação de Sutherland (2000) para bacias altamente conectadas

$$EIA = 0,4 \times (TIA)^{1,2} \quad (30)$$

na qual *EIA* é a área impermeável eficaz e *TIA* é a área total impermeável.

¹² Fendrich (2002) aponta que tais solos possuem capacidade máxima de infiltração de cerca de 86mm/dia.

¹³ ARNELL (1989) apud Fendrich (2002) indica que a perda inicial em área impermeável descoberta varia entre 2 e 6mm.

Quanto ao volume de escoamento superficial (proveniente das superfícies impermeáveis) ligado clandestinamente à rede de esgoto, admitiu-se o valor de 15%, o qual mostrou melhor desempenho na calibração. De acordo com o banco de dados da SENEPAR (2012) *apud* Bertolino (2013) apenas 2,3% dos imóveis localizados na bacia hidrográfica do rio Belém possuem ligação irregular de águas pluviais na rede de esgotamento sanitário. A partir de medições de vazão na rede de esgoto e de visitas técnicas para verificação da ligação, Bertolino (2013) diagnosticou o quão falho é o banco de dados da companhia de águas, identificando importante acréscimo de vazão em dias de chuva (em até 4 vezes a vazão normal) e grande quantidade de imóveis com ligação irregular. À exemplo, 27% das casas vistoriadas em um pequeno recorte do bairro Boqueirão possuíam ligação irregular.

O índice de escoamento de base e a constante de recessão foram obtidos com base na série de vazões observadas, utilizando-se o programa *BFLOW* (em m³/s). O programa apresentou três possibilidades de índices de escoamento de base (0.64, 0.56 e 0.52), sendo 0.52 o valor que apresentou melhor desempenho tanto na análise visual do fluviograma quanto no processo de calibração de *Aquacycle*.

3.6.1 Desempenho da simulação

O desempenho da simulação realizada para geração do balanço hídrico mostrou-se satisfatório. O período de referência utilizado para calibração com os parâmetros de *SIM/REC* e *E* foi o ano de 2010, que apresentou os valores 0,93 e 0,57 respectivamente, ambos considerados aceitáveis, segundo a estrutura de modelagem e calibração de Mitchell (2005).

Além das ferramentas e verificação disponíveis no modelo, foi feita verificação visual em escala temporal diária das vazões medidas e simuladas. A Figura 23 mostra as curvas de permanência das vazões observadas e simuladas para o período.

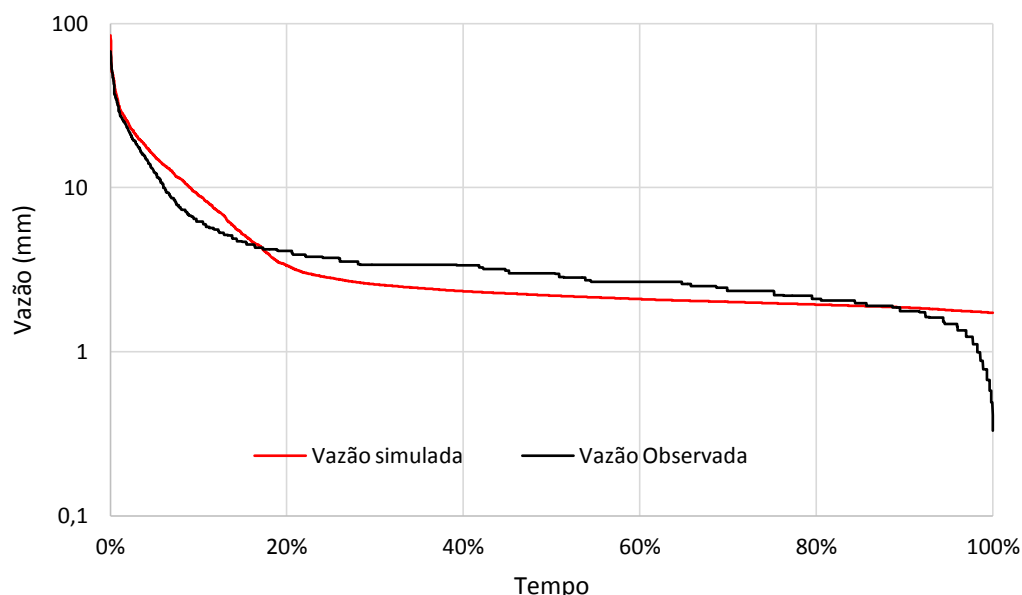


FIGURA 23 CURVA DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS

A Figura 24 mostra a comparação entre a série diária de vazões observadas e simuladas. É possível identificar a capacidade do modelo na reprodução das vazões baixas e médias e menor eficiência na simulação de vazões de pico. Tal fato pode ser explicado a partir de uma das premissas de Mitchell (2005), descrita no item 3.4.11 desta dissertação, que considera que o escoamento superficial de áreas permeáveis não ocorre até que a capacidade de armazenamento da água no solo seja excedida, subestimando o escoamento superficial durante chuvas intensas.

Nota-se que no início da série, entre os anos de 2002 e 2005, as vazões baixas observadas são maiores que as vazões baixas simuladas. Este resultado pode estar associado a qualidade da série de vazões observadas, ou ainda estar associada a alterações na bacia ocorridas ao longo do tempo e não consideradas no modelo. A primeira delas refere-se ao fato de que as imagens utilizadas para mapeamento do uso da terra e determinação de áreas permeáveis e impermeáveis na área de estudo são de 2013. Possivelmente, nos anos anteriores, a porcentagem de área permeável fosse um pouco maior, contribuindo para o aumento no volume do escoamento de base.

A segunda mudança importante diz respeito ao fato de que a Prefeitura de Curitiba, em parceria com a SANEPAR promove, desde o ano de 1991, o Programa de Despoluição Ambiental do rio Belém (PDA) (LARA, 2014). O

projeto trabalha na expansão da rede de esgotamento sanitário na bacia do rio Belém, bem como na fiscalização das ligações à rede a partir de visitas técnicas autorizadas (VTA's). Em função disso, possivelmente o volume de esgoto in natura despejado diretamente nos corpos hídricos venha diminuindo ao longo do tempo, contribuindo para a consequente diminuição ao longo do tempo das vazões baixas observadas no rio Belém.

Dados tais resultados provenientes da calibração, destaca-se ainda a dificuldade de medição de vazões em bacias urbanas, em função das atividades deposicionais e erosivas nos canais, bem como a constante execução de dragagens.

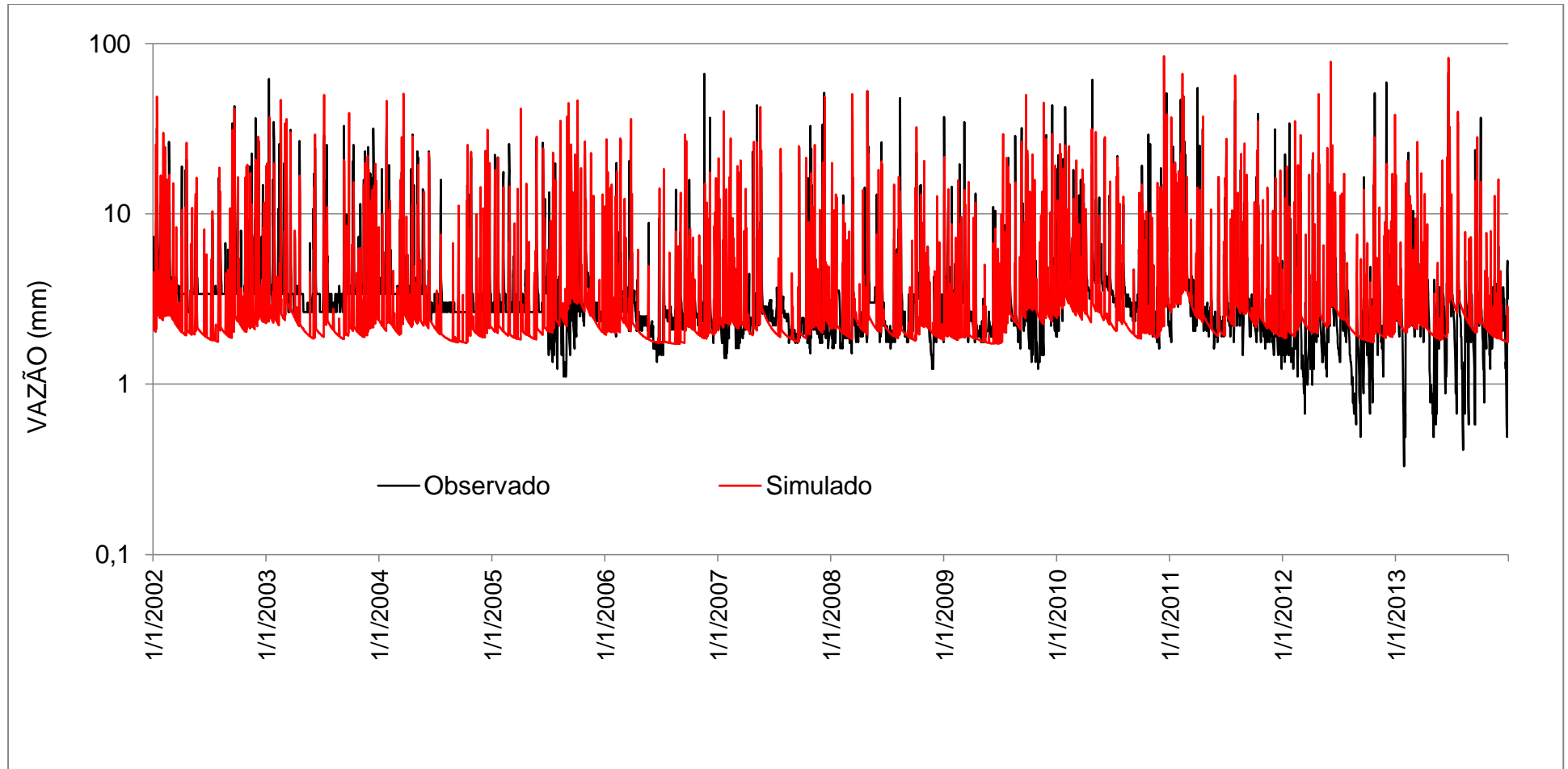


FIGURA 24 FLUVIOGRAMA DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA

Com base na análise integrada da lei de zoneamento de Curitiba (IPPUC, 2015) e da densidade demográfica por setores censitários (IBGE, 2010) na área de estudo, foram delimitadas um total de 14 unidades de resposta hidrológica, ou *clusters* (FIGURA 25). Tais *clusters* são utilizados como unidades individuais de análise para diagnóstico e cálculo de balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Belém.

Em função da metodologia adotada para definição dos *clusters*, cada área delimitada deve apresentar um padrão diferente em sua dinâmica hídrica. Isto porque a lei de zoneamento (IPPUC, 2015) influi diretamente no ciclo urbano da água, especialmente no que diz respeito à porcentagem mínima de área permeável por lote, enquanto que a densidade demográfica influi diretamente no volume de água importada e esgoto produzido. Tais elementos são fundamentais para autenticidade dos dados gerados na posterior simulação de balanço hídrico por unidade de resposta hidrológica (item 4.4).

Na sequência é apresentada uma caracterização básica de cada *cluster* delimitado:

O *cluster* nº 1 (JB), localizado no bairro Jardim Botânico, possui área de aproximadamente de 0,5km². Contempla a área do parque Jardim Botânico e uma pequena quantidade de quadras residenciais.

O *cluster* nº 2 (SE) caracteriza-se por possuir um grande número de altas edificações, permitidas pela lei de zoneamento de Curitiba (IPPUC, 2015), para as avenidas República Argentina e Sete de Setembro. Com quase 1,6km², espacializa-se entre os bairros Água Verde, Batel, Rebouças, Jardim Botânico, Cristo Rei, Alto da XV e Centro.

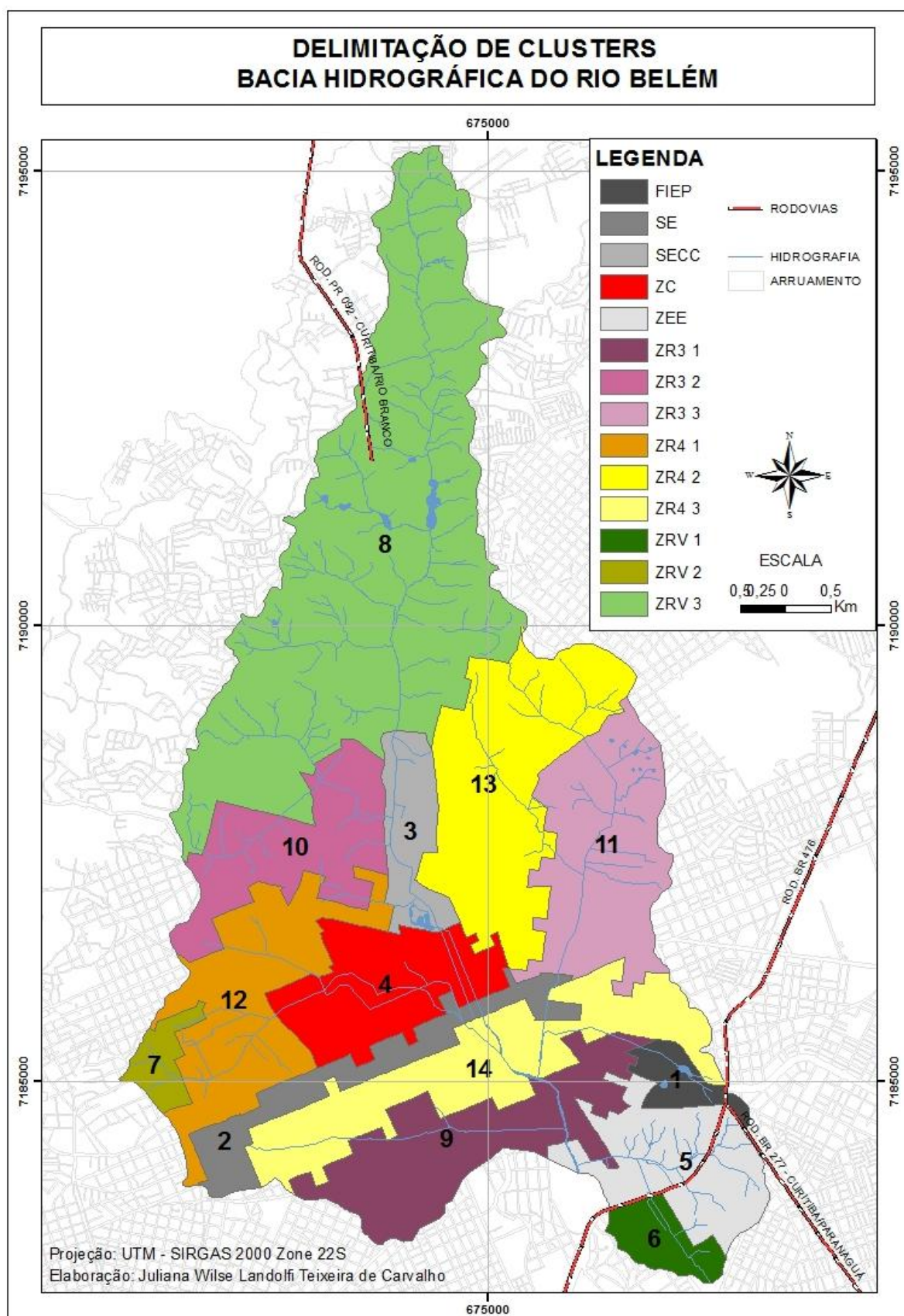


FIGURA 25 CLUSTERS DA BACIA DO RIO BELÉM

O *cluster* 3 (SECC), localizado no bairro Centro Cívico, abriga os prédios de administração pública da cidade de Curitiba e do Estado do Paraná, bem como algumas quadras residenciais, cujo número de pavimentos é livre, de acordo com a lei de Zoneamento de Curitiba (IPPUC, 2015). Contempla ainda as áreas do Bosque do Papa e do Passeio Público. Apresenta área total de 1,2km².

Com 2,5km², o *cluster* n° 4 (ZC) corresponde à área central de Curitiba, em cujo número de pavimentos por edificação também é livre. Já o *cluster* n° 5 (ZEE), localizado entre os bairros Jardim das Américas e Jardim Botânico, com área de 2,36km², possui, em geral, limite de 4 pavimentos por edificação. Contempla a área dos campi Botânico e Politécnico da UFPR, a FIEP e quadras residenciais.

Os *clusters* 06 (ZRV1), 07 (ZRV 2) e 08 (ZRV 3) correspondem às chamadas zonas residenciais várias, que em geral permitem a construção de no máximo dois pavimentos por edificação. Possuem áreas de 0,7km², 0,5km² e 12,56km², respectivamente. ZRV 1 encontra-se entre os bairros Guabirota e Jardim das Américas, ZRV 2 entre os bairros Batel e Bigorrrilho, enquanto que ZRV 3, localizado na porção norte da área de estudo, espacializa-se entre os bairros Cachoeira, Abranches, Barreirinha, São Lourenço, Pilarzinho, Vista Alegre, Bom Retiro e Ahú. ZRV3 corresponde à maior unidade de resposta hidrológica da área de estudo, sendo também a área onde estão as nascentes do rio Belém e os parques São Lourenço, Paulo Leminski, Bosque Gutierrez e Bosque do Alemão.

Os *clusters* 9 (ZR3 1), 10 (ZR3 2) e 11 (ZR3 3) correspondem aos setores de predominância da Zona Residencial 3. Suas áreas são de, respectivamente, 3,2km², 2,6km² e 3,5km². ZR3 1 está entre os bairros Prado Velho, Parolin, Água Verde, Rebouças e Jardim Botânico. ZR3 2 está entre os bairros Mercês, São Francisco e Bom Retiro, enquanto que ZR3 3 está entre os bairros Cabral, Hugo Langue, Juvevê, Alto da XV e Cristo Rei. A zona residencial três caracteriza-se pela possibilidade de edificações com até 3 pavimentos.

Por fim, os *clusters* 12 (ZR4 1), 13 (ZR4 2) e 14 (ZR4 3) correspondem aos setores de predominância da Zona Residencial 4. Suas áreas são de, respectivamente, 3,3km², 4,4km² e 3,6km². ZR4 1 está entre os bairros São

Francisco, Mercês, Bigorriho e Batel. ZR4 2 está entre os bairros Alto da XV, Alto da Gloria, Juvevê, Ahú e Cabral, enquanto que ZR4 3 está entre os bairros Água Verde, Rebouças, Jardim Botânico e Cristo Rei. Por serem área de predominância de Zona Residencial 4, são áreas próximas ao Centro, onde são permitidas edificações com até 6 pavimentos (IPPUC, 2015).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA DINÂMICA HÍDRICA DAS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA

A compilação dos dados obtidos através do mapeamento de uso e ocupação da terra na área de estudo evidencia as particularidades de cada área de resposta hidrológica delimitada (FIGURAS 26 e 27).

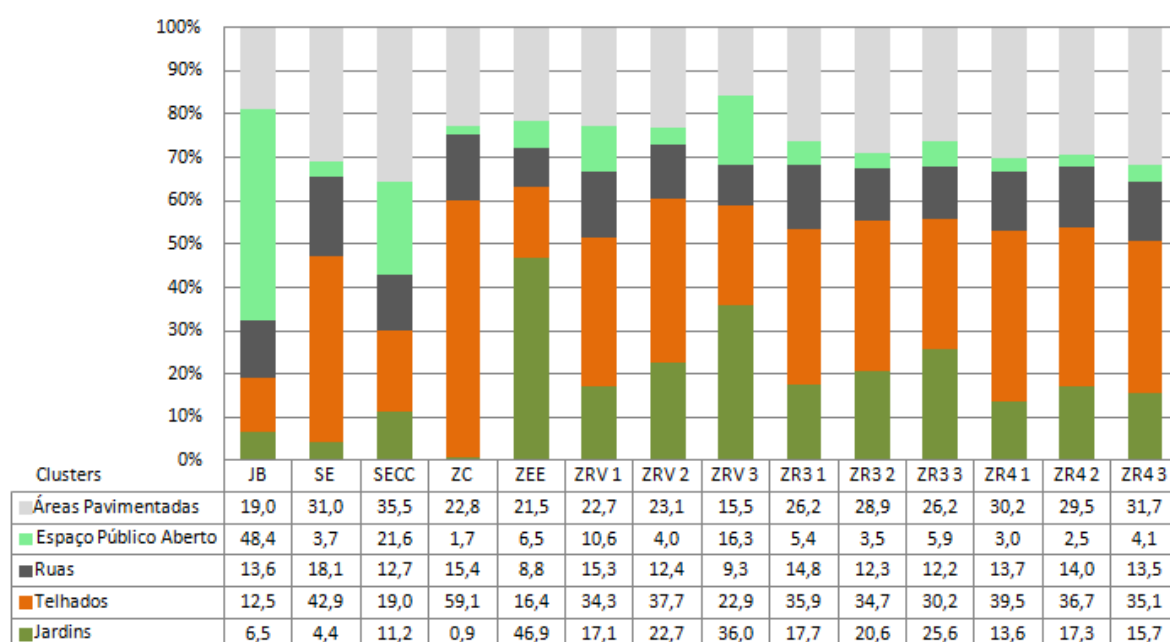
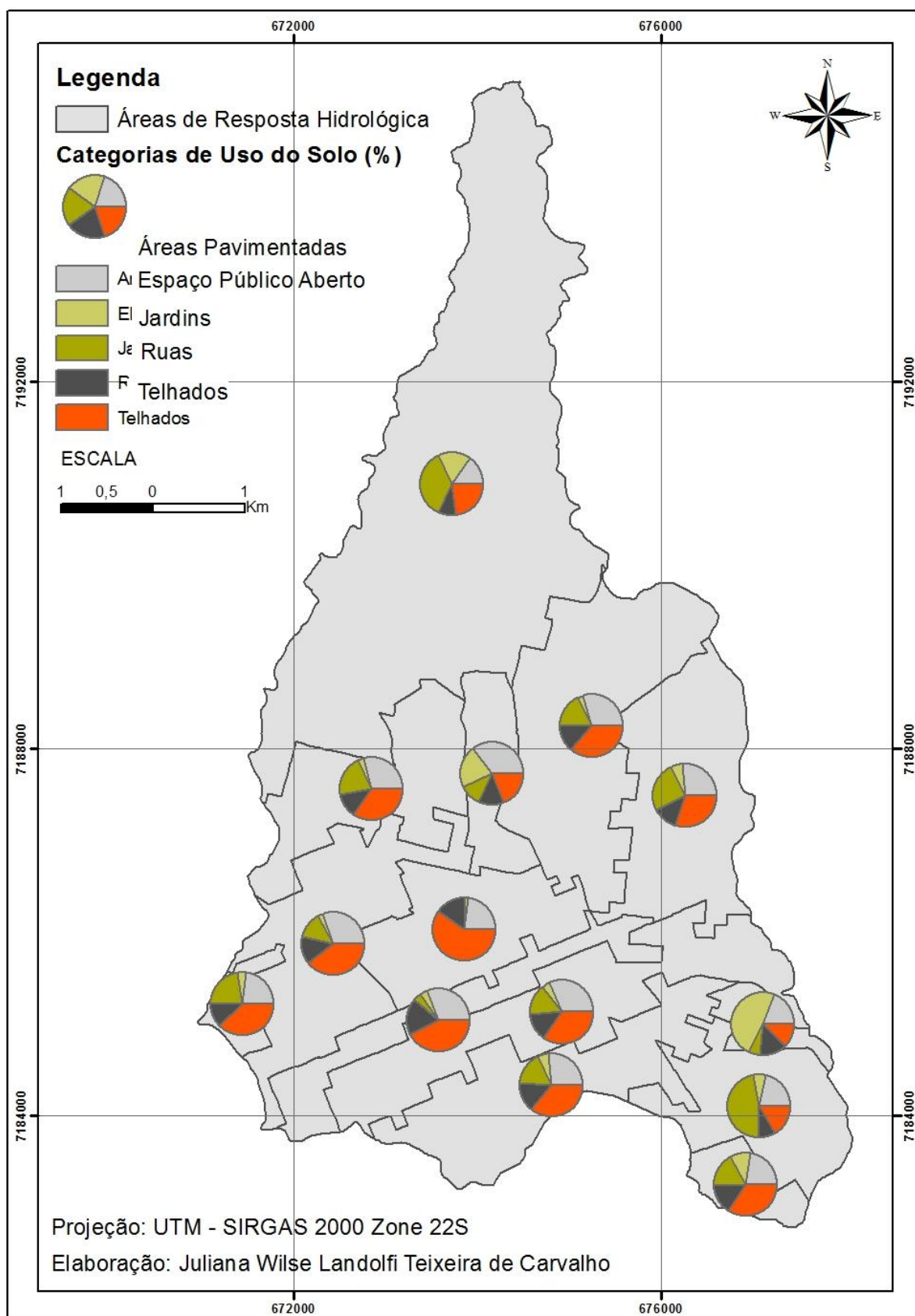


FIGURA 26 DISTRIBUIÇÃO DE CATEGORIAS DE USO DA TERRA POR CLUSTER

FIGURA 27 DISTRIBUIÇÃO DE CATEGORIAS DE USO DA TERRA POR *CLUSTER*

Observa-se maior variação - entre *clusters* - nas categorias *jardins*, *telhados* e *espaço público aberto*. Áreas com predominância de parques, como é o caso de JB e ZRV 3, apresentam maior representatividade da categoria *espaço público aberto*. Em concordância a lei de zoneamento da cidade de Curitiba, as áreas mais afastadas do centro, como é o caso de ZRV 1 (17,1%), ZRV 2 (22,7%), ZRV 3 (36%) e ZR3 3 (25,6%), possuem maiores áreas de jardins. O *cluster* ZEE é uma exceção a esta regra, pois contempla propriedades dos campi Botânico e Politécnico da UFPR, bem como da FIEP, todas elas com significativa área florestada, com 46,9% para a categoria *jardins*.

Em relação à predominância da classe *telhados*, observa-se que a mais significativa delas está na zona central da cidade de Curitiba (59,1%). A proximidade do Centro aponta para maior representatividade das áreas de telhado e menor existência de jardins. À exemplo: ZR4 1 (39,5% para telhados e 13,6% para jardins), ZR4 2 (36,7% para telhados e 17,3% para jardins), ZR4 3 (35,1% para telhados e 15,7% para jardins), SE (42,9% para telhados e 4,4% para jardins), ZR3 1 (35,9% para telhados e 17,7% para jardins) e ZR3 2 (34,7% para telhados e 20,6% para jardins).

As classes *ruas* e *áreas pavimentadas* possuem menor variação entre as unidades mapeadas, variando de 15,5% a 35,5% para a categoria *áreas pavimentadas* e de 8,8 a 18,1% para a categoria *ruas*.

Com base no mapeamento de ocupação e uso da terra foi realizado o cálculo de estimativa de áreas impermeáveis para cada uma das unidades de resposta hidrológica. Com base nas premissas do modelo *Aquacycle* (MITCHELL, 2005), as categorias *jardins* e *espaço público aberto* foram agrupadas como permeáveis e as categorias *ruas*, *telhados* e *áreas pavimentadas* como impermeáveis.

O gráfico de distribuição de áreas permeáveis por *cluster* (FIGURA 28) mostra maior grau de impermeabilização do solo nas unidades ZC (97,4%), SE (92%), ZR4 1 (83,4%), ZR4 2 (80,2%) e ZR4 3 (80,3%). Observa-se, portanto, que quando mais próximo à área central, maior será a taxa de impermeabilização do solo. As unidades com maior porcentagem de solo permeável são, por sua vez, JB com 55% de áreas permeáveis, ZEE com 53,4%, e ZRV 3, com 52,3%.

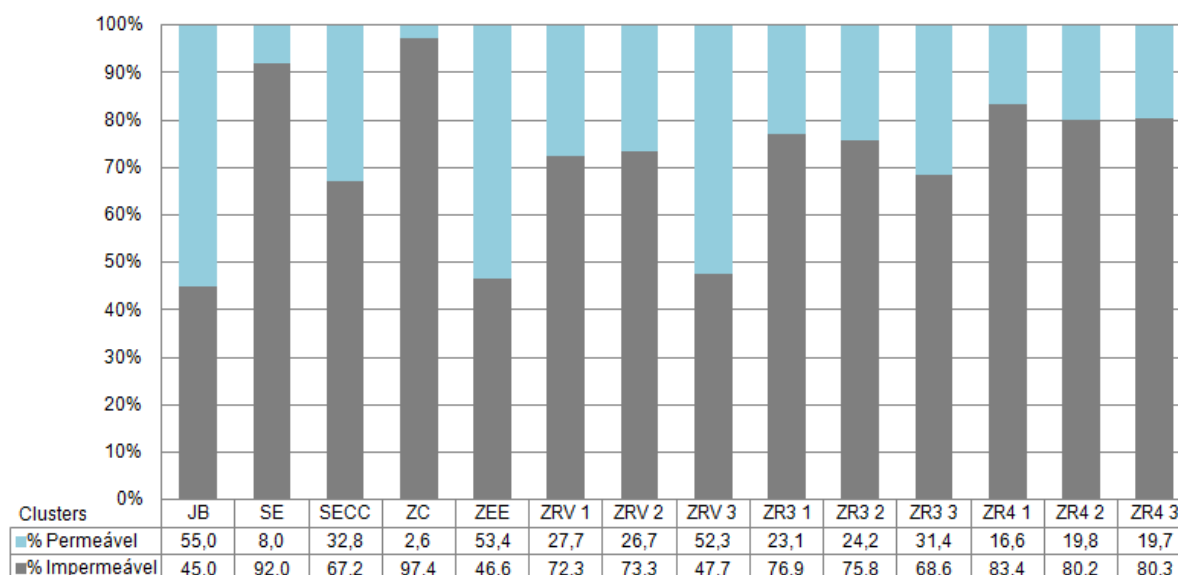


FIGURA 28 DISTRIBUIÇÃO DE ÁREAS PERMEÁVEIS E IMPERMEÁVEIS POR *CLUSTER*

Considerando-se a média entre os *clusters* para cada categoria de uso da terra mapeada, a compilação dos dados mostrou que a área de estudo apresenta predominância de ocupação de telhados (33% da área total), seguido de áreas pavimentadas (26%), jardins (18%), ruas (13%) e com menor representatividade, os espaços públicos abertos, com 10% da área total (FIGURA 29). Embora haja importantes variações nos padrões de uso e ocupação do solo para cada *cluster*, conforme observado no gráfico da Figura 27, o cálculo de desvio padrão mostra que há similaridade entre as áreas de resposta hidrológica. O desvio padrão observado para cada categoria foi de 12,2 para a categoria jardins, 12 para telhados, 2,4 para ruas, 12,5 para espaço público aberto e 5,5 para áreas pavimentadas.

Em relação à compilação de áreas permeáveis, chegou-se a média de 28% para a área de estudo, contra 72% de áreas impermeabilizadas – desvio padrão 16. Tal fato reitera o alto grau de desenvolvimento urbano da área de estudo, com consequente propensão à intensificação de problemas ligados à dinâmica da água em meio urbano.

A impermeabilização de 72% da área de uma bacia hidrográfica certamente traz importantes mudanças no regime natural de escoamento da água, diminuindo a infiltração da água no solo e a alimentação do aquífero freático, aumentando os picos de vazão máxima do rio Belém e aumentando o risco e frequência de enchentes. A compilação dos dados de uso e ocupação

do da terra e impermeabilização da bacia sinaliza a existência de problemas ligados à gestão de águas na área de estudo.

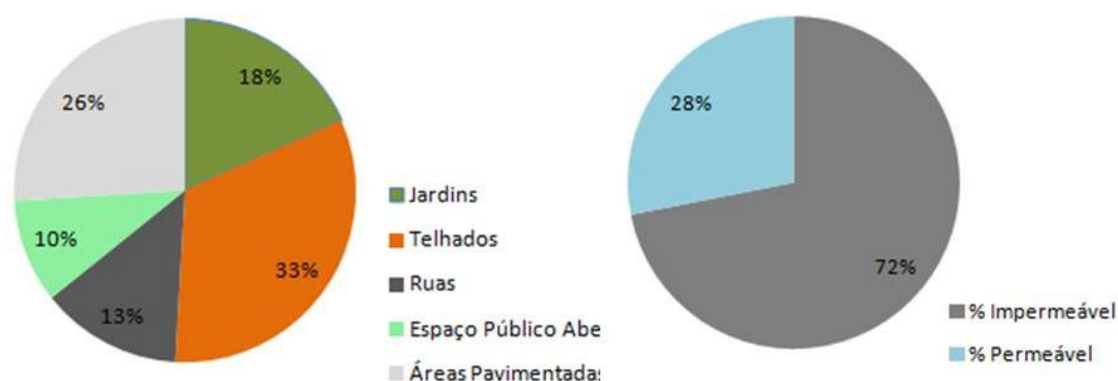


FIGURA 29 DISTRIBUIÇÃO DE CATEGORIAS DE USO DA TERRA, ÁREAS PERMEÁVEIS E IMPERMEÁVEIS NA BACIA DO RIO BELÉM

4.3 SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BELÉM

Os resultados da simulação do balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Belém com modelo distribuído *Aquacycle* encontram-se ilustrados de modo esquemático na Figura 30. Nota-se claramente o propósito estrutural do modelo de Mitchell (2005), que integra a dinâmica natural do ciclo hidrológico aos elementos inseridos pelo homem no sistema urbano.

Das entradas de água no sistema, 61% provêm da precipitação (1449 mm/ano) e 39% é água captada (917 mm/ano). As saídas de água se distribuem, por sua vez, da seguinte maneira: 65% via escoamento fluvial (1535 mm/ano), 18% via evapotranspiração (431 mm/ano) e 17% via rede de esgotamento sanitário (400 mm/ano).

A simulação, com embasamento em dados oficiais da Prefeitura de Curitiba (CURITIBA, 2013), mostra que do volume de água captada apenas 60% chega às casas para consumo (550 mm/ano). Os outros 40% (367 mm/ano) correspondem a vazamentos na distribuição, que, por conseguinte, alimentam o aquífero freático. Ressalta-se que como o modelo não possui possibilidade de entrada de dados para perdas no abastecimento por erros de medição, ocorrendo então a simplificação da entrada deste dado.

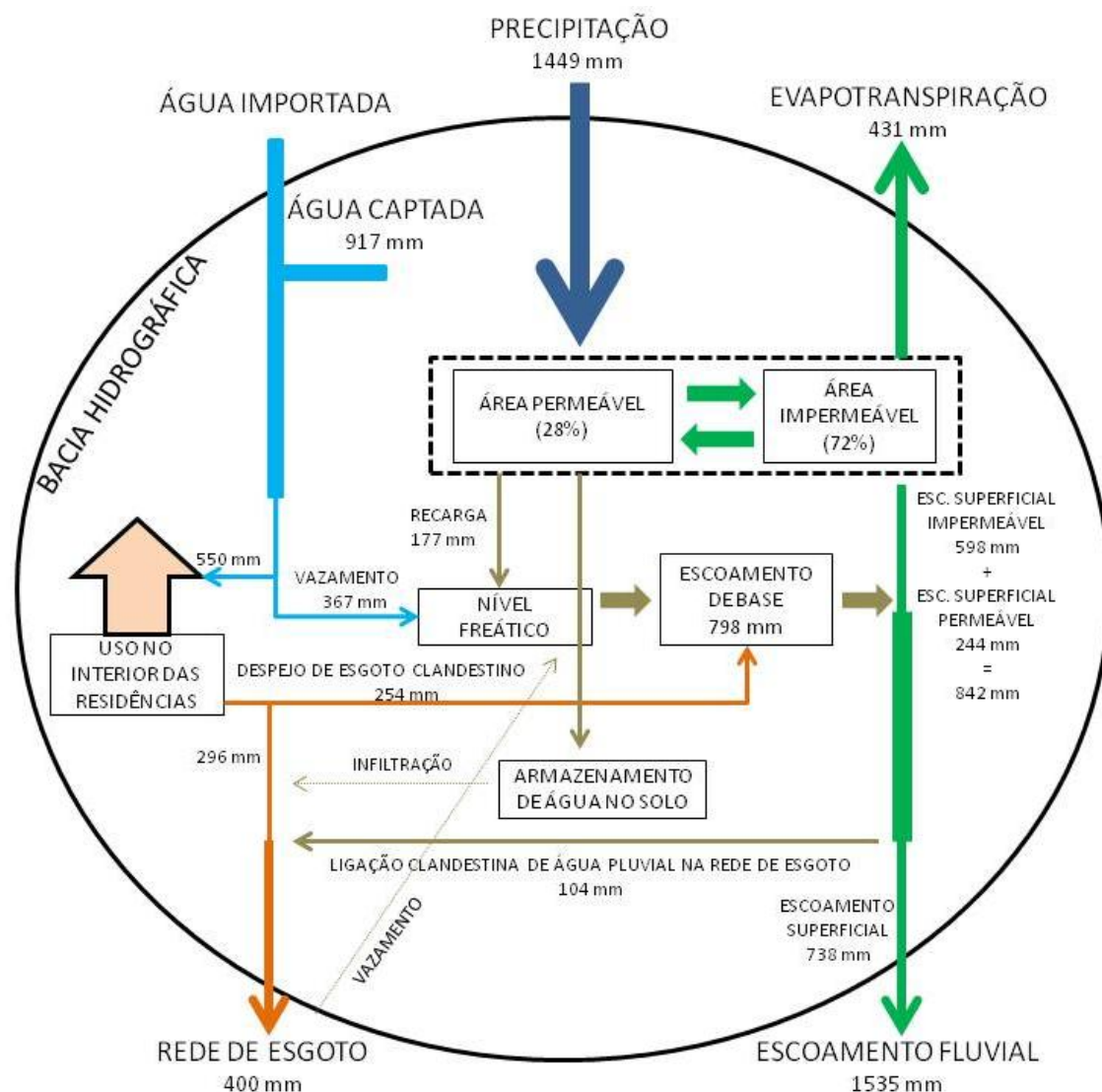


FIGURA 30 BALANÇO HÍDRICO ANUAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BELÉM

Do volume de água precipitada (1449 mm/ano), a simulação aponta que apenas 177 mm/ano infiltram no solo e realimentam o aquífero freático de modo natural, evidenciando os efeitos da impermeabilização na dinâmica hídrica da bacia. Outros 842 mm/ano convertem-se em escoamento superficial – 598 mm provenientes de áreas impermeáveis e 244 mm de áreas permeáveis - sendo que destes, apenas 738 mm chegam ao rio, devido ao volume de ligações clandestinas de águas pluviais na rede de esgoto, que desviam cerca de 104 mm/ano. Conforme anteriormente citado, este volume de águas pluviais ligados ao esgotamento sanitário corresponde a 15% do escoamento superficial gerado em superfícies impermeáveis.

Outro resultado relevante desta simulação diz respeito à recarga do aquífero freático e ao escoamento de base. Nota-se na Figura 30, que o volume total do escoamento de base (544 mm/ano) é composto em 67% por vazamentos no sistema de abastecimento público de água potável (367 mm/ano) e apenas 33% pela recarga natural do aquífero freático advinda da água precipitada (177 mm/ano). Por outro lado, tem-se que 46% do esgoto gerado na bacia é lançado diretamente nos corpos hídricos (254 mm/ano), contribuindo na composição da vazão total do rio Belém. Resulta, portanto, que se retirado o volume de esgoto no rio e se reduzido o índice de perda de água no abastecimento público, a vazão de base do rio Belém diminuiria significativamente, especialmente em períodos de estiagem.

Em relação ao escoamento fluvial, observa-se que a área de estudo possui grande potencial de risco para inundações, especialmente nas áreas delimitadas na Figura 11, tendo em vista que o escoamento superficial corresponde à 47% da contribuição à vazão anual do rio (738 mm), volume este concentrado no tempo e resultante da grande porcentagem de áreas impermeabilizadas, conforme diagnóstico exposto no capítulo 4.2. O restante da contribuição da vazão fluvial é composto em 23% por vazamentos no sistema de abastecimento público, 19% de esgoto lançado ao rio sem tratamento e 11% da recarga natural do aquífero freático.

Evidencia-se ainda o grande volume de esgoto doméstico e industrial lançado diretamente no rio Belém e seus afluentes, que corresponde a 46% (245 mm/ano) de todo o esgoto gerado (550 mm/ano) na área de estudo. Os outros 54% (296 mm) correspondem à esgoto coletado, conduzido à Estação de Tratamento de Efluentes (ETE Belém), juntamente com o volume de águas pluviais ligadas à rede de esgoto, conforme anteriormente citado. Conforme resultado da simulação, do volume total de efluentes conduzido a partir da área de estudo para a estação de tratamento durante o ano, 74% correspondem a esgoto e cerca de 26% a águas pluviais, provocando sobrecarga de vazão na estação de tratamento em dias de maior pluviosidade, conforme já evidenciado por Bertolino (2013).

Os resultados da simulação do balanço hídrico para a bacia hidrográfica do rio Belém evidenciam a quantidade e seriedade dos problemas referentes à gestão dos recursos hídricos na região. Verificam-se problemas em todas as

esferas de gestão: no abastecimento público de água potável, no sistema de esgotamento sanitário, no controle e fiscalização por parte da Sanepar e da Prefeitura de Curitiba em relação às ligações clandestinas de águas pluviais na rede de esgoto, ou de esgoto na rede pluvial, e no controle e fiscalização da Prefeitura sobre a lei de zoneamento e uso e ocupação do solo.

4.4 AVALIAÇÃO DOS COMPONENTES DO CICLO HIDROLÓGICO FRENTE À CONFIGURAÇÃO URBANA NAS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA

Juntamente com a determinação do balanço hídrico para a bacia do rio Belém, a simulação com o modelo *Aquacycle* gerou resultados com informações de balanço hídrico para cada *cluster* em separado, possibilitando a compreensão das diferenças existentes na dinâmica hídrica das unidades de resposta hidrológica. Os índices considerados mais relevantes quanto à problemática dos efeitos da urbanização no balanço hídrico (vazão do rio, escoamento superficial, escoamento de base, recarga do aquífero freático e evapotranspiração) são apresentados na Figura 31, juntamente com a porcentagem de impermeabilização do solo de cada *cluster*.

Verifica-se relação direta entre o incremento de áreas impermeáveis e o aumento do escoamento superficial. As unidades com maior percentual de áreas impermeabilizadas, como é o caso de ZC (*cluster* 4), com 97,4% e de SE (*cluster* 2) com 92%, apresentam os maiores volumes de escoamento superficial: 1044 e 988 mm/ano, respectivamente. As unidades menos impermeabilizadas, como JB (*cluster* 1) com 45%, ZEE (*cluster* 5) com 46,6% e ZRV3 (*cluster* 8) com 47,7%, apresentam alturas de escoamento superficial de 548, 521 e 551 mm/ano, valores bem abaixo da média da bacia (738 mm/ano).

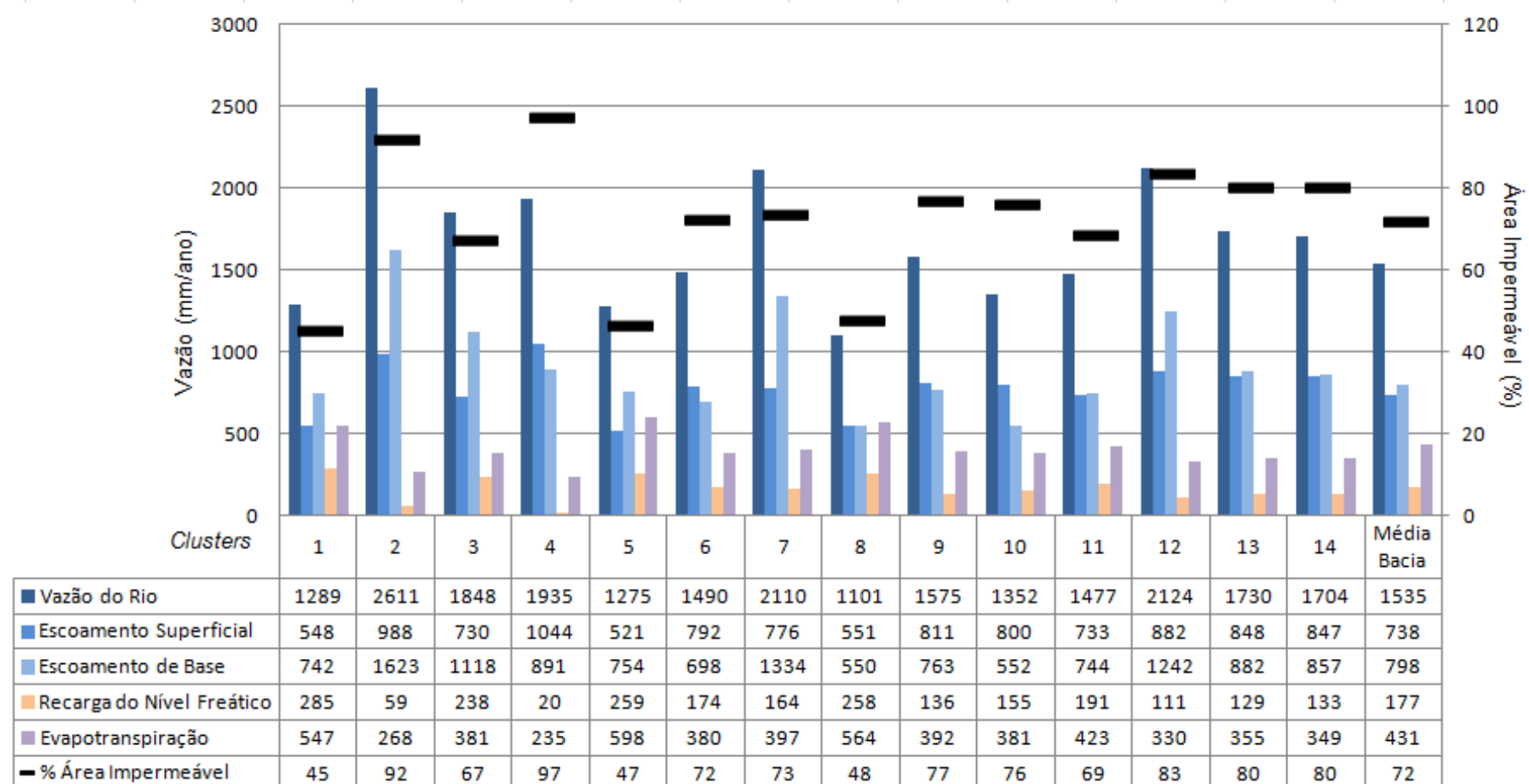


FIGURA 31 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NA ESCALA CLUSTER

A Figura 32 mostra a relação entre o escoamento superficial simulado e a porcentagem de área impermeável para as diferentes unidades de simulação consideradas na bacia (*Clusters*).

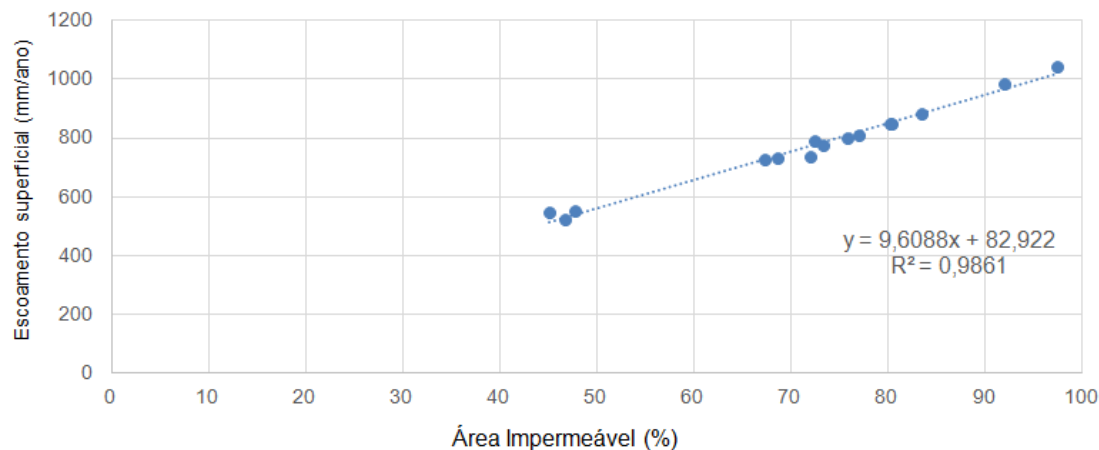


FIGURA 32 RELAÇÃO ENTRE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM

A equação resultante do ajuste entre as variáveis permite estimar o volume de escoamento superficial para qualquer recorte espacial da área de estudo, desde que se tenha conhecimento da porcentagem de área impermeável.

Uma tendência contrária (decréscimo) ocorre com os volumes de evapotranspiração e reabastecimento do aquífero freático, com relação à porcentagem de áreas impermeáveis. As unidades que apresentam maior percentual de áreas impermeabilizadas, *clusters* 4 e 2 retratam cenários com os menores volumes de evapotranspiração (235 e 268 mm/ano) e recarga do aquífero freático (20 e 59 mm/ano). As unidades menos impermeabilizadas (*clusters* 1, 5 e 8) apresentam respectivamente os volumes de 547, 598 e 564 mm/ano para evapotranspiração e 285, 259 e 258 mm/ano para recarga do aquífero freático.

Uma relação inversa é observada, com correspondência de 95,5%, quando evapotranspiração e percentual de área impermeável são comparadas (FIGURA 33). A mesma tendência ocorre entre os volumes de reabastecimento do aquífero freático e o percentual de área impermeável, cuja relação de correspondência é 93,4% (FIGURA 34).

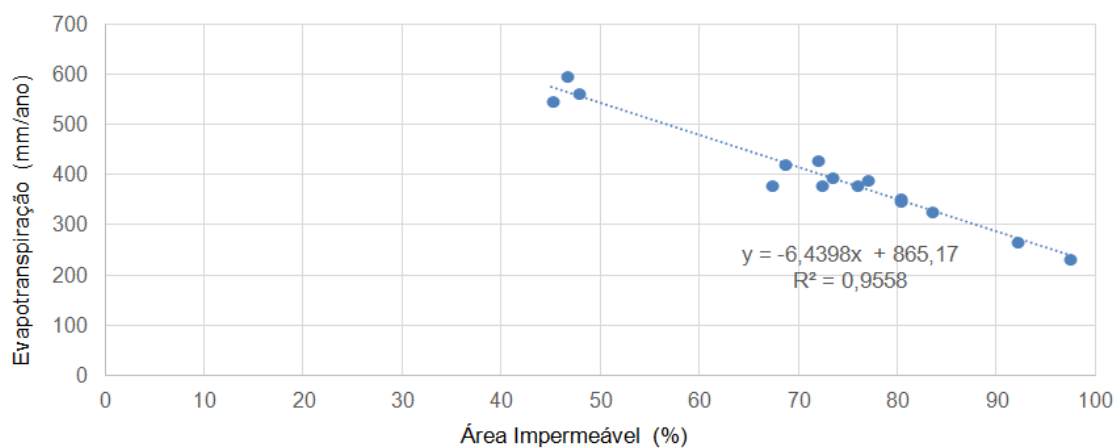


FIGURA 33 RELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM

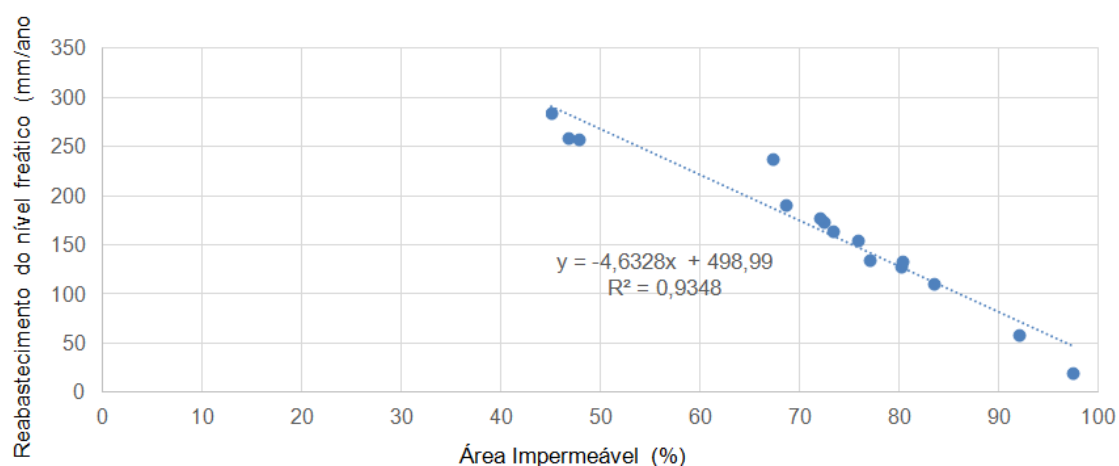


FIGURA 34 RELAÇÃO ENTRE REABASTECIMENTO DO NÍVEL FREÁTICO E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM

Por outro lado, o escoamento de base simulado não responde de maneira tão linear as alterações da superfície, conforme se observa na Figura 35.

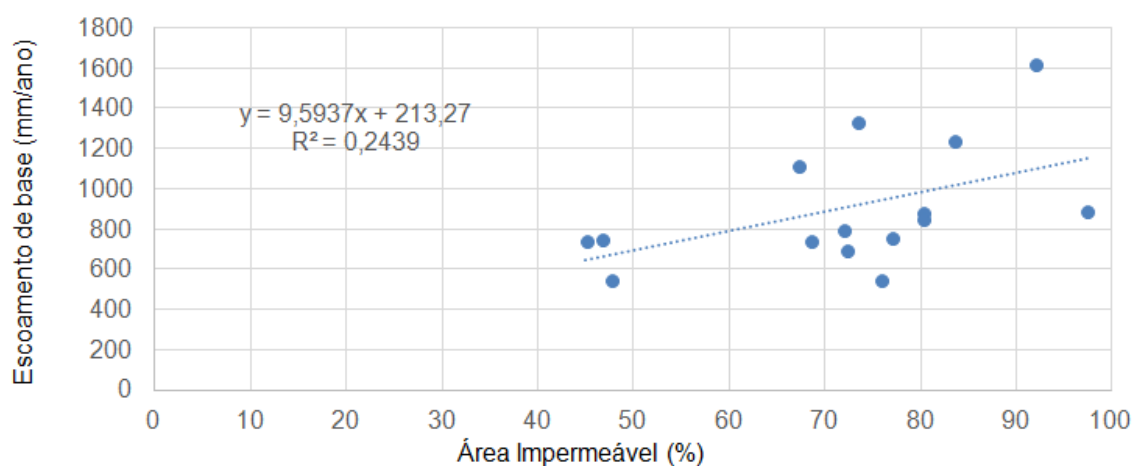


FIGURA 35 RELAÇÃO ENTRE ESCOAMENTO DE BASE E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM

A resposta pouco sensível do escoamento de base simulado à impermeabilização do solo se deve ao grande volume de contribuição proveniente dos vazamentos na rede de abastecimento de água potável e do despejo de esgoto diretamente no rio. Sendo estes volumes praticamente constantes, considera-se que para a bacia do rio Belém, o escoamento de base mantém-se também relativamente constante, independentemente das condições pluviométricas.

Reflete-se na vazão do rio a dessensibilização do escoamento de base à impermeabilização do solo, conforme se observa na Figura 36, que mostra um coeficiente de determinação entre as variáveis de apenas 55,7%.

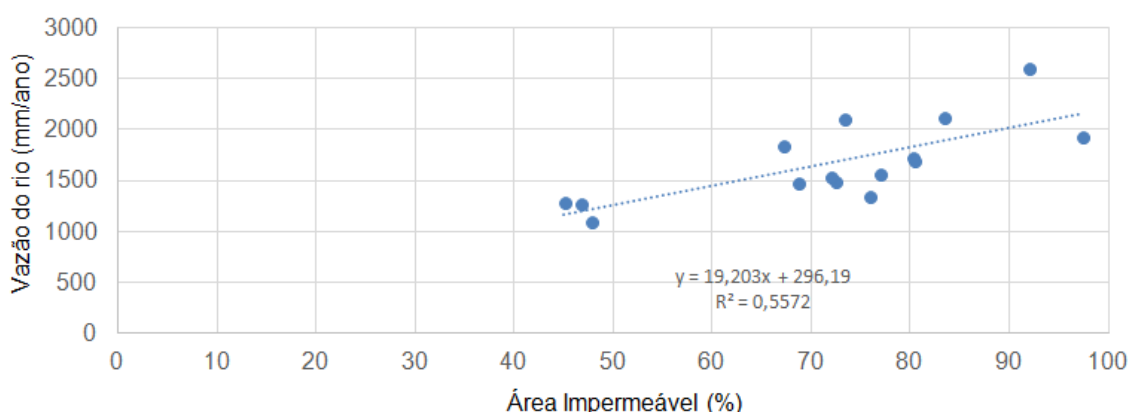


FIGURA 36 RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E ÁREA IMPERMEÁVEL NA BACIA DO RIO BELÉM

Se a área de estudo não contasse com grandes volumes de perda de água no abastecimento público e de esgoto clandestinamente lançado diretamente ao rio, seria natural a observação de uma relação inversa entre o escoamento de base e a porcentagem de áreas impermeáveis, o que poderia melhorar significativamente a resposta da vazão total com relação da impermeabilização do solo (FIGURA 36).

Nota-se ainda na Figura 31 que, nos valores médios da bacia e em alguns *clusters*, o volume de contribuição do escoamento de base anual é maior do que o volume de escoamento superficial. Para a área de estudo, os valores médios são de 798 mm/ano para escoamento de base e 738 mm/ano para escoamento superficial. A maior diferença foi notada no *cluster* 2, que apresentou valores de 1623 mm/ano para escoamento de base e 988 mm/ano para escoamento superficial. Com base na análise dos resultados obtidos,

considera-se que os *clusters* com maior concentração populacional contribuem com maior volume de escoamento de base, devido ao incremento na demanda de fornecimento de água potável, na produção de esgoto e consequente despejo do mesmo diretamente no rio.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da presente pesquisa permitem as seguintes conclusões:

Com base na análise integrada da lei de zoneamento de Curitiba e da densidade demográfica por setores censitários, foi possível delimitar um total de 14 áreas de resposta hidrológica (*clusters*) para a área de estudo. Tais áreas servem como unidades individuais de análise para diagnóstico dos efeitos da configuração urbana no balanço hídrico.

O mapeamento de uso e ocupação da terra na área de estudo evidencia as particularidades de cada área de resposta hidrológica delimitada. A bacia é composta em 33% por telhados, 28% em áreas pavimentadas, 18% em jardins, 13% em ruas e 10% em espaço público aberto. Embora haja importantes variações nos padrões de uso e ocupação do solo para cada *cluster*, o cálculo de desvio padrão mostra que há similaridade entre as áreas de resposta hidrológica.

Em relação à compilação de áreas permeáveis, chegou-se a média de 28% para a área de estudo, contra 72% de áreas impermeabilizadas, reiterando o alto grau de desenvolvimento urbano da bacia, com consequente propensão à intensificação de problemas ligados à dinâmica da água em meio urbano. A análise do mapeamento de uso da terra em cada *cluster* mostra que quando mais próximo à área central, maior é a taxa de impermeabilização do solo encontrada.

Quanto à simulação do balanço hídrico, *Aquacycle* apresentou desempenho satisfatório na modelagem da área de estudo. O período de referência utilizado para calibração apresenta valores considerados aceitáveis, segundo a estrutura de modelagem e calibração de Mitchell (2005).

Conforme se observa nos resultados da simulação do balanço hídrico para a área de estudo, a impermeabilização de 72% do solo traz importantes mudanças na dinâmica hídrica da bacia. Em média, observa-se um valor baixo na recarga do aquífero freático através da infiltração da água no solo (177 mm/ano), um valor elevado de escoamento superficial (738 mm/ano) e um valor pequeno de evapotranspiração real (431 mm/ano).

Ainda em relação ao cálculo e simulação do balanço hídrico para a bacia, enfatiza-se a dificuldade de determinação de alguns dados de entrada para modelagem, dada a quantidade de situações irregulares encontradas no sistema de drenagem de águas pluviais e residuais na área de estudo, cenário este que se repete na grande maioria das cidades brasileiras. Além da presença de situações irregulares, como despejo de esgoto na drenagem pluvial, ou ligações clandestinas de águas pluviais na rede de esgoto, as imprecisões e discordâncias entre dados oficiais da SANEPAR, Prefeitura de Curitiba e IBGE em relação às irregularidades ou outros dados como vazamento de água no abastecimento público dificultam o diagnóstico. Tais índices foram, portanto, ajustados com base na melhor resposta obtida na fase de calibração do modelo, de forma a reproduzir o balanço hídrico da bacia.

A determinação dos dados de entrada, neste modelo em específico, exige um conjunto de adaptações para utilização do modelo australiano na realidade das cidades brasileiras. Destaca-se a adaptação realizada para inserção no modelo do volume de esgoto despejado clandestinamente nos rios, cuja atividade não está prevista no *Aquacycle*. A opção de adicioná-lo junto à perda de água no abastecimento de água potável, tendo em vista que seu volume soma-se ao escoamento de base e, por conseguinte, à vazão do rio, mostra-se uma alternativa para viabilizar a simulação sem necessidade de alteração na programação do modelo.

Os principais resultados do diagnóstico de balanço hídrico obtidos são: 40% da água tratada é perdida via vazamentos no sistema de abastecimento público; cerca de 46% do esgoto gerado na área de estudo é lançado diretamente no rio Belém e seus afluentes sem tratamento; cerca de 15% do escoamento superficial gerado em áreas impermeáveis é ligado diretamente à rede de esgoto, provocando sobrecarga da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE Belém) em eventos de precipitação.

A avaliação dos componentes do ciclo hidrológico frente à configuração urbana nas unidades de resposta hidrológica evidencia relação direta entre o incremento de áreas impermeáveis e o aumento do escoamento superficial, e diminuição na recarga do nível freático via infiltração natural da água pluvial no solo e diminuição da evapotranspiração real. Devido ao grande volume de contribuição proveniente dos vazamentos na rede de abastecimento de água

potável e do despejo de esgoto diretamente no rio, os quais são incorporados na vazão de base, este componente do ciclo hidrológico apresenta pouca sensibilidade à variação espacial da impermeabilização do solo.

Os resultados da presente pesquisa reiteram a observação de Tucci (2014b), que sinaliza que a inserção de elementos antrópicos nas bacias de drenagem faz crescer a complexidade dos sistemas hidrográficos, alterando profundamente a dinâmica natural do ciclo hidrológico. A simulação do balanço hídrico para a bacia hidrográfica do rio Belém, com a utilização do modelo distribuído *Aquacycle*, foi capaz de retratar de modo eficiente os efeitos da configuração urbana no balanço hídrico, possibilitando que tanto o objetivo geral quanto os objetivos específicos desta pesquisa fossem alcançados.

No contexto da Hidrologia Urbana, esta pesquisa contribui tanto à divulgação de novos métodos para diagnóstico e gestão do sistema de águas urbanas, quanto ao diagnóstico e gestão em escala local, na bacia hidrográfica do rio Belém, com o apontamento dos problemas identificados.

Observa-se que apesar de rio Belém ser um importante rio curitibano, drenando a região central da cidade e outros bairros densamente habitados, esta pesquisa aponta que nele se refletem sérios problemas de gestão hídrica. Os problemas encontram-se nas esferas de abastecimento público de água, no esgotamento sanitário, no controle e fiscalização das leis de uso da terra e das ligações prediais de esgoto e águas pluviais. Tal descontrole resulta no alto índice de poluição e contaminação do rio Belém e no agravamento dos eventos de enchentes.

Com base nos resultados e na experiência obtidos no presente trabalho, recomenda-se o aprofundamento nos estudos de balanço hídrico na área de estudo selecionada e em outras bacias hidrográficas urbanas brasileiras, dado contexto deficitário de gestão das mesmas. Recomenda-se também, para tal, a utilização do modelo *Aquacycle*, com as adaptações anteriormente citadas ao cenário brasileiro, como instrumento de simulação de cenários de configuração urbana, visando identificar eventuais melhorias para a gestão do ciclo urbano da água neste ambiente.

Dentre as possibilidades de estudos futuros, decorrentes desta pesquisa, destacam-se o ajuste de dados de entrada com maior precisão e a simulação de cenários com esquemas alternativos de contenção e uso de

águas pluviais, visando amortizar os efeitos negativos da urbanização sobre o balanço hídrico, especialmente com a diminuição dos picos de vazão máxima, aumento da infiltração da água no solo e diminuição no volume de água importada à bacia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9649**: Projetos de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

AFONSO, J.A.C. **Renaturalização e revitalização de rios urbanos: uma abordagem sistêmica**. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Urbana) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. 2011.

ÁGUAS PARANÁ. **Mapas e dados espaciais**. Disponível em <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php>> Acesso em: 30/03/2015.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper n.56, 1998.

BREMBATTI, K. Alguns bairros de Curitiba gastam três vezes mais água que outros. **Gazeta do Povo**, Curitiba, 4 dezembro 2014. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/alguns-bairros-de-curitiba-gastam-tres-vezes-mais-agua-que-outros-eh0o54ig7f7ivu35nlp19yvym>>. Acesso em: 01/03/2016.

BINDER, W. **Rios e Córregos, Preservar - Conservar – Renaturalizar: A Recuperação de Rios, Possibilidades e Limites da Engenharia Ambiental**. SEMADS: Rio de Janeiro, 2001.

_____. Case Studies: Isar – Germany. In: **Expo Zaragoza 2008** (Exposición Internacional "Agua y Desarrollo Sostenible"), Zaragoza, 2008.

BOFF, L. **Sustentabilidade: o que é, o que não é**. 4 ed. Petrópolis: Vozes, 2015.

BOLLMAN, H.A.; EDWIGES, T. Avaliação da qualidade das águas do rio Belém, Curitiba-PR, com o emprego de indicadores quantitativos e perceptivos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.13, n. 4, p. 443-452, 2008

BOTELHO, R.G.M. Bacias Hidrográficas Urbanas. In: GUERRA, A.J.T. **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil n.53, de 18/03/2005, p. 58-63**. Brasília, DF, 2005.

BRASÍLIO, W. **Industrialização e degradação ambiental: o caso do rio Belém, em Curitiba-PR**. 93f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BRINQUIS, M.L.P.S.M. **Simulation of the Total Urban Water Cycle in a Neighbourhood of a Spanish City and Establishment of Urban Water Sustainable Indicators**. 136 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental Urbana) - Universidade de Wageningen, Dundee, 2007.

BROCANELI, P.F. **O ressurgimento das águas na paisagem paulistana: fator fundamental para a cidade sustentável**. 323 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

CALDERARI, E.S. **A reinserção dos cursos de água em áreas urbanas**. Estudo de caso: microbacia córrego Jataí-Uberlândia/MG. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

CANHOLI, A.P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CARVALHO, J.W.L.T. **Perspectiva de renaturalização de rios urbanos: estudo de caso na micro-bacia hidrográfica córrego do Aviário**. 75f. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Geografia) – Setor Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CARVALHO, J.W.L.T. SANTOS, I. Experiências de renaturalização de rios no mundo. **Anais do IV Simpósio Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Campo Mourão**, 2013.

_____. Processos de recuperação de corpos hídricos e o emergente conceito de renaturalização. **Anais do 4º Encontro Internacional da Governança da Água**. São Paulo, 2013.

CASA DA MEMÓRIA DE CURITIBA. **Último ato de um drama**. Correio de Notícias, 15 de setembro de 1978.

_____. **Canalização do Rio Belém: anseio curitibano de 80 anos**. A Voz do Paraná: ed. 230, 29 de setembro de 1978.

_____. **A volta dos lambaris ao lírico rio Belém**. Diário do Paraná, 22 de janeiro de 1980.

_____. **Rio Belém terá lambari de novo**. Estado do Paraná, 01 de março de 1980.

CASSETI, V. A natureza do espaço geográfico. In: MENDONÇA, F.; KOZEL, S. **Elementos de epistemologia da geografia contemporânea**. 1 ed. rev. 2009. Curitiba: Editora URPR, 2002.

CHENEVEY, B.; BUCHBERGER, S. Impact of Urban Development on Local Water Balance. **World Environmental and Water Resources Congress: Showcasing the Future**. p. 2625-2636, 2013.

CLEUGH, H.A. **The Impact of Suburban Design on Water Use and Microclimate**. p. 2019-2025, 2005.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981.

_____. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999.

COELHO, M.C.N. Impactos ambientais em áreas urbanas: teorias, conceitos e métodos de pesquisa. In: GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. 6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 20-45.

CUNHA, S.B. Geomorfologia Fluvial. In GUERRA, A. J. T.; CUNHA. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 12 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. p.

CURITIBA. Lei n. 9800, de 03 de janeiro de 2000. Dispõe sobre o zoneamento, uso e ocupação do solo no município de Curitiba, revoga as Leis nº 4199/72, 5234/75, 5263/75, 5490/76, 6204/81, 6769/85, 7068/87 e 7622/91, e dá outras providências. Diário Oficial do Município de Curitiba, 2000.

CURITIBA, Decreto n. 293, de 22 de março de 2006, referente a lei nº 10.785/03, de 18 de setembro de 2003.

CURITIBA. **Plano Municipal de Saneamento de Curitiba: PMS**. Curitiba, 2013.

CURITIBA. **Zoneamento e uso do solo: Legislação Municipal uso e ocupação do solo - leis e decretos complementares**. 2015.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N.L.; AISSE, M.M.; GARCAS, C.M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4 ed. Curitiba: Editora Universitária Champagnat, 1997.

FENDRICH, R. **Diagnóstico dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Belém**. Curitiba: Assembléia Legislativa do Paraná, 2002.

GOOGLE EARTH PRO, V.7.1. Image NASA; Image © 2015 Digital Globe. Região da Micro-Bacia Córrego do Aviário, Curitiba. Pr. 2015.

GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. 6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **Censo 2010**. Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br/resultados/resumo>. Acesso em 01 de novembro de 2014.

IPPUC (2007). **Geoprocessamento: Shapes Curitiba**. Disponível em: <http://ippuc.org.br/geodownloads/geo.htm> Acesso em 30/03/2015.

JACOBI, P.R. Impactos socioambientais urbanos: do risco à busca da sustentabilidade. In: MENDONÇA, F. **Impactos socioambientais urbanos**. Curitiba: Editora UFPR, 2004. p. 169-184.

JACOBI, P.R.; FRACALANZA, A.P.; SÁNCHEZ, S.S. Governança da água e inovação na política de recuperação de recursos hídricos na cidade de São Paulo. **Cad. Metrop**. São Paulo, v. 17, n. 33, pp. 61-81, 2015.

KARKA, P. A case study on integrated urban water modelling using Aquacycle. **Proceeding of the 10th International Conference on Environmental Science and Technology**. Greece, p. 629-639, 2007.

KOBIYAMA, M. “Science is beautiful”: aplicação da hidrologia no gerenciamento de desastres naturais. In: **V Oficina Internacional sobre Enfoques Regionais para o Desenvolvimento e Gestão de Reservatórios na Bacia do Prata**. UNESCO/ICHARM/UNEP, Foz do Iguaçu, Anais, 2008.

LARA, M.V.R. **Análise crítica de programas de revitalização de rios urbanos na bacia hidrográfica do rio Belém em Curitiba-PR**. 150 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Setor de Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a Universität Stuttgart, Curitiba, 2014.

LAST, E.; MACKAY, R. **Developing a new scoping model for urban water sustainability**. 2° SWITCH Scientific Meeting. Tel-Aviv, Israel, 2007.

LAZARO, T.R. **Urban Hydrology: a multidisciplinary perspective**. Pensilvânia: CRC PRESS, 1990.

LEE, J; PAK, G.; YOO, C.; KIM, S.; YOON, J. Effects of land use change and water reuse options on urban water cycle. **Journal of Environmental Sciences**, nº 22(6), p. 923–928, 2010.

LEKKAS, D.F.; MANOLI, E.; ASSIMACOPOULOS, D. Integrated urban water modelling using the aquacycle model. **Global NEST Journal**, v. 10, n. 3, p. 310-319, 2008.

LEOPOLD, L.B. **Hydrology for urban land planning: a guidebook on the hydrologic effects of urban land use**. U.S. Geological Survey, Washington, 1968.

_____. **A view of the river**. 4th. ed. Cambridge: Harvard University Press, 1996.

LIMA, P.J. **Hidrologia urbana: conceitos básicos**. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (Universidade de Coimbra), 2010.

LIMA, J.A. **Morfologia urbana e ambiente: um estudo exploratório sobre os efeitos da renaturalização na estrutura configuracional urbana**. 158 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

LUDERITZ, V.; JIIPNER, R.; MULLER, S.; FELD, C.K. Renaturalization of streams and rivers - the special importance of integrated ecological methods in measurement of success. An example from Saxony-Anhalt (Germany). **Limnologica**. v 34, p 249-263, 2004.

MACHADO, A.T.M. **A construção de um programa de revitalização na bacia do Rio São Francisco**: Estudos Avançados 195-210 22 (63): São Paulo /SP, 2008.

MARANDOLA JR.E; HOGAN, D.J. **Vulnerabilidade do lugar vs. vulnerabilidade sociodemográfica: implicações metodológicas de uma velha questão**. R. bras. Est. Pop., Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, p. 161-181, jul./dez., 2009.

MITCHELL, G.; MEIN, R.; MCMAHON, T.A. **The reuse potential of urban stormwater and wastewater**. Austrália: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 1999.

_____. Modelling the urban water cycle. **Journal of Environmental Modelling and Software**, nº 16, p. 615-629, 2001.

MITCHELL, V. G. **Aquacycle User Guide**. CRC for Catchment Hydrology. Monash University, Melbourne, Australia, 2005.

MITCHELL, V.G. DIAPER, C. **UVQ: A tool for assessing the water and contaminant balance impacts of urban development scenarios**. WATER SCIENCE & TECHNOLOGY, 2005

MORETTI, R.S. Transformações em curso nas cidades brasileiras e seus impactos na qualidade da água em meio urbano. In: MENDONÇA, F. **Impactos socioambientais urbanos**. Curitiba: Editora UFPR, 2004. p. 209-218.

PARQUE Municipal Nascentes do Belém. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/parques-e-bosques-parque-municipal-nascentes-do-belem/314>>. Acesso em: 01/03/2016.

POMPEO, C.A. Drenagem urbana sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre. v.5, n.1, p. 15-23, 2000.

PORTO, R.; FILHO, K.Z.; TUCCI, C.; BIDONE, F. Drenagem urbana. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. 6 reimpr. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2014. p. 805-847.

RETRATOS do Belém: a trajetória de um rio urbano. Disponível em <<http://retratosdobelem.blogspot.com.br/>> Acesso em 01/02/2015

RIBEIRO, F. Forte chuva atinge Curitiba, alaga ruas e deixa trânsito caótico na região central. **Banda B**. Curitiba, 22 fevereiro 2016. Disponível em: <<http://www.bandab.com.br/noticias/forte-chuva-atinge-curitiba-alaga-ruas-e-deixa-estacionamento-de-shopping-debaixo-dagua/>> Acesso em 24/02/2016

SANEPAR. CADASTRO TÉCNICO. Curitiba, 2012. Banco de dados da SANEPAR.

SANTOS, R.F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SILVEIRA, A.L.L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. 6 reimpr. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2014. p. 35-51.

SITUMORANG, M.R. **Modelling urban water cycle: An approach for future urban water supply alternatives-Case study Accra, Ghana**. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, Holanda, 2008.

SMITH, M.P.; SCHIFF, R.; OLIVERO, A.; MACBROOM, J. **The Active River Area: A Conservation Framework for Protecting Rivers and Streams**. Boston: The Nature Conservancy, 2008.

SOUZA, C.F.; CRUZ, M.A.S.; TUCCI, C.E.M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: *planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbana*. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre. v 17, n. 2, p. 9-18, 2012.

SOUZA, D.P.; KOBIYAMA, M.; Ecoengenharia em Zona Ripária: *Renaturalização de Rios e Recuperação da Vegetação Ripária*. **I Seminário de Hidrologia Florestal: Zonas Ripárias**. Alfredo Wagner, p. 121-131, 2003

SUTHERLAND, R.C. Methods for estimating the effective impervious area of urban watersheds. **The Practice of Watershed Protection**, Article 32, 193–195, 2000.

TSUTIYA, M. T.; SOBRINHO, P. A. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 3ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

TUCCI, C.E.M. **Água no meio urbano**: Livro da água doce - cap 14, Instituto de pesquisa hidráulica. UFRGS – Porto Alegre, 1997a.

_____. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre. v.2, n.2, p. 5-12, 1997b.

_____. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre. v.5, n.1, p. 61-68, 2000.

_____. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2001.

_____. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos**. Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas: Câmara temática sobre recursos hídricos. Brasília/DF, 2002.

_____. Águas Urbanas. In: **Estudos Avançados**. v. 22, n. 63, p. 97 a 112, 2008.

_____. Balanço hídrico. **Blog do Tucci: recursos hídricos e meio ambiente**. 2009. Disponível em <<http://rhama.net/wordpress/?p=116>>. Acesso em 01/08/2015

_____. Hidrologia: ciência e aplicação. In:____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. 6 reimpr. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2014a. p. 25-33.

_____. Controle de enchentes. In:____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. 6 reimpr. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2014b. p. 622-658.

TUCCI, C.E.M., COLLISHONN, W. Drenagem urbana e controle de erosão. In: TUCCI, C.E.M. e Marques, D.M.L.M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. Universidade, pp. 119 – 127. 1998.

TUNDISI, J.G. Recursos hídricos no futuro: *problemas e soluções*. **Estudos Avançados**. V. 22 (63), p. 07-16, 2008.

VIESSMAN, JR.; LEWIS, G.L. **Introduction to Hydrology**. New York, Happer Collins College Publishers, 4° ed, 1996. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/122386831/Introduction-to-Hydrology#scribd>>. Acesso em 01/08/2015.